

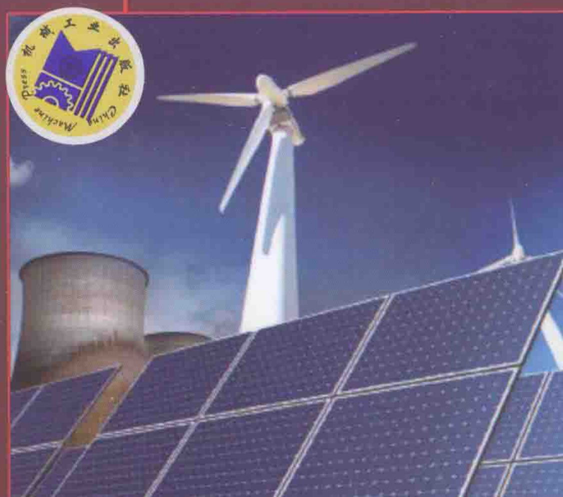
国际电气工程先进技术译丛

微电网和主动配电网

Microgrids and Active Distribution Networks

（印度） S.Chowdhury
（印度） S.P.Chowdhury 著
（英国） P.Crossley

《微电网和主动配电网》翻译工作组 译





机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

微电网和主动配电网

Microgrids and Active Distribution Networks

（印度）S. Chowdhury
（印度）S. P. Chowdhury　著
（英国）P. Crossley
《微电网和主动配电网》翻译工作组　译

机械工业出版社

分布式发电和微电网在电网中的应用，改变了传统配电网的运行管理方式。本书是由S. Chowdhury、S. P. Chowdhury和P. Crossley共同携手，总结10年来的研究成果而撰写的关于微电网与主动配电网的技术专著。书中全面论述了微电网和主动配电网的各种技术和经济问题，包括微电网和主动配电网的基本概念、发电技术、影响、控制、管理、经济活力和市场参与等方面内容。第1、2章论述了分布式电源、微电网的基本概念和发电技术特点；第3章论述了微电网的影响；第4~7章论述了微电网的控制、保护、通信和主动配电网管理系统的技术特性，以及微电网与主电网综合运行的适用性；第8章论述了微电网和主动配电网电能质量和可靠性问题；第9章和第10章分别讨论了微电网经济性和市场参与方面的内容。附录部分给出了各种分布式电源和微电网的建模与仿真特性，以及微电网市场参与的报价案例。

本书对于电力行业的管理者、技术人员，以及电力技术和市场的研究者，具有很大的指导和借鉴意义。深刻理解本书中的内容，将有助于个人和电力企业适应未来能源应用的发展变化。这是一本关于分布式发电、微电网和主动配电网的实用书籍。

图书在版编目（CIP）数据

微电网和主动配电网/（印）乔杜里（Chowdhury，S.）等著；《微电网和主动配电网》翻译工作组译. —北京：机械工业出版社，2014.6
（国际电气工程先进技术译丛）
书名原文：Microgrids and active distribution networks
ISBN 978-7-111-46937-7

Ⅰ.①微…　Ⅱ.①乔…②微…　Ⅲ.①电网-电力工程-研究②配电系统-研究　Ⅳ.①TM727

中国版本图书馆CIP数据核字（2014）第119150号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号　邮政编码100037）
策划编辑：付承桂　责任编辑：韩　静　版式设计：霍永明
责任校对：刘怡丹　封面设计：马精明　责任印制：李　洋
北京振兴源印务有限公司印刷
2014年8月第1版第1次印刷
169mm×239mm · 14.5印张 · 266千字
0001-4000册
标准书号：ISBN 978-7-111-46937-7
定价：59.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
社服务中心：（010）88361066	教材网：http：//www.cmpedu.com
销售一部：（010）68326294	机工官网：http：//www.cmpbook.com
销售二部：（010）88379649	机工官博：http：//weibo.com/cmp1952
读者购书热线：（010）88379203	**封面无防伪标均为盗版**

《微电网和主动配电网》翻译工作组

组　长：唐　敏

副组长：苏　适

成　员：潘　蕊　杨家全　张文斌　严玉廷

杨　洋　邹京希　严正波

顾　问：李留保　段一雄

序

为了应对大规模分布式清洁能源发电并网带来的新挑战，传统电网正处于从单向电力传输的被动配电网（无源配电网）向双向电力传输的主动配电网（有源配电网）转变的重大转折时期。主动配电网需要采用更加灵活和智能的控制系统，以充分利用可再生分布式能源，同时也应采用先进的电网技术将分布式能源集成为智能微电网。

本书是英国工程技术学会（IET）继 2000 年出版《嵌入式发电》(Embedded Generation）之后的又一成功之作，非常及时地出版于新能源广泛应用和电力技术快速发展的关键时期。本书系统阐述了微电网和主动配电网的各种技术和经济，对微电网和主动配电网的基本概念、发电技术、影响、运行、控制和管理、经济可行性和市场参与度等问题进行了专题论述，提出了能够使传统被动电网转变为未来主动电网的关键支撑技术，提供了各种分布式电源和微电网的模型与仿真特性，以及微电网参与电力市场的报价案例。本书作者还重点关注将新的分布式能源集成到集中发电系统中，以及从环保的角度提出使分布式发电具有吸引力的新能源技术等全新内容。

本书既涉及技术创新，又涵盖了经济和市场方面的内容，无疑将对我们推进电网技术升级具有一定的启示作用。云南电网公司组织翻译的这本技术专著，希望能为广大电力从业人员和电网企业技术人员提供良好的借鉴和参考。

王良友

译者的话

近年来，可再生能源和电动汽车的兴起使新一轮能源革命的序幕逐渐拉开。为应对新的变化和挑战，传统的电网将迎来重大的转折，即从单向潮流的被动配电网（无源配电网）向双向潮流的主动配电网（有源配电网）转变，集合了分布式发电、储能装置和负荷的微电网应运而生，使智能电网的建设如火如荼。主动配电网要应用未来的电网技术，要求采用灵活的智能控制系统，能集合分布式能源并成为智能电网的重要组成部分。微电网的研发工作仍处于起步阶段，有大量问题尚待研究，目前全球的试点项目还不到200个。面对新的变革和发展，拥有世界上最复杂交直流输电网络的中国南方电网的专业技术人员，迫切需要关注和学习主动配电网和微电网的相关技术。

2013年，中国南方电网云南电网公司有幸获得了《Microgrids and Active Distribution Networks》一书的英文稿，拟将其作为公司系统学习主动配电网和微电网技术的重要教材和对实际研发工作的指导书。为让本书发挥最大效益，云南电网公司国际合作部牵头组织对本书进行翻译，联合云南电网公司电力研究院智能电网研究所成立翻译工作委员会和翻译工作组，并与机械工业出版社就本书的翻译出版达成了相关合作协议。

本书的主要翻译任务由从事智能电网研发的一线科技人员完成，其中不乏云南电网公司的技术专家、博士和硕士。此外，云南电网公司国际合作部和云南省翻译协会电力分会的资深翻译专家承担和参与了本书中文译稿的校对和审稿工作。为确保本书的专业准确性，翻译工作组在征求云南电网公司相关专业部门和单位意见的基础上，还采用集体研讨的方式逐段逐句对译稿反复推敲和修改，并几易其稿后才最终定稿。

特别需要说明的是，由于本书是阐述微电网和主动配电网技术和经济问题的第一本专著，涉及许多新技术、新概念和新术语。且英、美等国在微电网和主动配电网技术方面领先全球，因此本书还涉及一些我们不太熟悉的专业内容，这些都成为我们翻译中的主要难点和困扰。为此，我们全面理解原文，在充分尊重原文内涵的基础上，尽可能考虑对国内专业背景和中文表达习惯的兼顾，并将一些重要的英文专业术语附在中文翻译之后，以使读者更好地阅读和理解。

本书是我们继完成美国麻省理工学院最新最前沿“未来系列”研究报告之第六项——《电网的未来》翻译出版之后承担的又一重大翻译任务。尽管我们倾尽心力，并在总结《电网的未来》一书翻译出版工作经验的基础上有所改进和提高，但囿于翻译水平、专业知识和工作时间等因素，错漏之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

相信本书介绍的微电网和主动配电网的基本概念、影响、运行管理、保护与控制、经济性和市场参与等方面的内容，能为正致力于建设国际先进电网企业的中国南方电网公司广大专业技术人员以及中国电力领域的广大读者提供有价值和有意义的学习参考。

《微电网和主动配电网》翻译工作委员会

2014 年 4 月 8 日

原书序言

又是一本关于分布式发电的书吗？最近似乎有很多关于可再生能源及主动配电网方面的书出版，许多会议的召开也都以此为主题，资金充足的研究项目和政府规定的补贴政策刺激和鼓励了对新能源系统的投资。正是由于这些素材才使得本书在此时备受欢迎。

基于相同的兴趣和互补的经验，S. Chowdhury、S. P. Chowdhury 和 P. Crossley 携手合作整理和汇编了过去10年很多分布式发电的同步发展情况。他们的书是英国工程技术学会（IET）继2000年出版了 Nick Jenkins 及其同事的《嵌入式发电》（*Embedded Generation*）之后的又一成功之作。新书并没有与之重复的内容，新书带来了最新的技术。

作者也考虑到从环保的角度使分布式发电具有如此吸引力的新能源技术。然而，这本书强调的是关于能够使传统的被动电网变为未来的主动电网的支撑技术。本书的重点是将新的分布式能源集成到集中发电系统，以及让新技术有效地运行于孤立系统中。

电力电子技术、通信和保护技术将“智能”引入未来的电网中。常常被忽略的是，智能电网并不会比设计与实施它们的聪明工程师更“智慧”。对这些技术细节的清晰介绍使这本书对从事研究的学生和那些从事新能源系统规划、设计和安装或是改造现有系统的工程师们具有一定的参考价值。

但是，这本书不仅仅是为技术专家而写的。孤立的技术很少会获得成功，好的设计在合适的情况下定会获得成功。所以这本书还介绍了主动配电网和分布式发电在经济和市场方面的内容，以补充工程师所需的专业技术知识。

最后，本书出版于电力行业的环境和经济演变的关键时期。对于电力行业的业内人士和即将加入该行业的学生，未来将是全然不同的，令人困惑且具有挑战性，甚至是令人兴奋的。全面理解本书的内容将有助于个人和电力公司适应变化。的确，这又是一本关于分布式发电的书，一本及时而有意义的、专业性适度且具有可读性的书。

开普敦大学

CT　Gaunt 教授

原书前言

世界各地的电力和能源工程师、学者、研究人员和利益相关者都在思考化石燃料资源枯竭、能源效率低下和环境污染的问题。因此，通过利用小规模、低碳、非传统的可再生能源，如天然气、沼气、风力发电、太阳能光伏发电、燃料电池、微型燃气轮机、斯特林发动机等，以本地配网电压等级发电并与配电网并网将成为一种新的趋势。这就是所谓的分布式发电（DG），其发电机被称之为分布式能源（DER）或微电源。在20世纪90年代后期，国际大电网会议（CIGRE）和国际供电会议组织（CIRED）工作组对有关分布式发电（DG）的重大问题开展了广泛的调查研究，并在其总结报告中进行了阐述。作为《京都议定书》的一部分，许多国家正在计划削减温室气体排放量（碳和氮的副产物）以应对气候变化和全球变暖。因此，许多国家政府都出台了新能源发电和利用的政策，以支持合理地利用这些低碳发电技术。

传统电网正处于从单向电力传输的被动配电网（无源配电网）向双向电力传输的主动配电网（有源配电网）转变的重大转折时代。主动配电网需要采用灵活和智能的控制系统，以利用来自可再生分布式能源的清洁电力，同时也应采用未来的电网技术将分布式能源集成为智能电网或微电网。为了适应分布式发电（DG）的高渗透率，现有分布式能源（DER）的“即装即忘”（Fit-and-Forget）应用策略在主动配电网管理中应当有所改变。为了在商业基础上真正实施微电网和主动配电网，有必要开展广泛的研究，但不限于以下几个方面：①广域主动控制；②自适应保护和控制；③配电网管理设备；④实时配电网络仿真；⑤先进的传感器和测量；⑥分布式普适通信；⑦基于智能方法的知识提取；⑧设计新颖的输电和配电系统。

据我们所知，本书是第一本阐述微电网和主动配电网各种技术和经济问题的专业书籍。微电网作为主动低中压电网，有可能通过提高能源效率、电能质量和供电可靠性而获得客户满意，为主电网带来巨大的效益。然而，在实施前需要认真解决大量的技术和管理问题，以及在全世界范围内进行广泛研究和政府干预。

本书广泛涉及微电网和主动配电网的基本概念、发电技术、影响、运行、控制和管理、经济可行性和市场参与等问题。

第1章论述了微电网和主动配电网的基本概念、需求、技术优势和面临的挑战、社会经济影响以及管理运行中的一些问题。

第2章讨论了微电网和主动配电网常用的几种DER技术的基本运行原理。

第3章论述了微电网在技术、经济和环境影响方面的概念。微电网对主电网的运行及其用户有着很大的影响。本章包括电/热的产生和利用、过程优化、电力和

天然气市场改革，以发挥微电网潜在的环境效益。还对诸如市场改革、配电系统影响、减少排放、通信基础设施的需求、辅助服务、协调保护等主要问题进行了详细讨论。

第4章论述了微电网与主动配电网管理系统的技术特性，以及微电网与主电网并网运行的适用性。还详细介绍了微电网中央控制器和微电源控制器需要控制的范围及程度。

第5章详细论述了微电网保护系统，其保护要求与传统配电系统和独立分布式能源（DER）安装的保护系统相比有很多不同之处。

第6章讨论了微电网、微电源及其控制器的电力电子接口的开发。用于微电网和主动配电网络的电力电子接口的功能，与在同一区域的SCADA和通信基础设施的开发直接相关。

第7章讨论了微电网管理中的SCADA和通信。

第8章论述了微电网和主动配电网的电能质量和可靠性问题。

第9章和第10章分别讨论了微电网的经济影响和市场参与。

致　谢

感谢英国布鲁内尔大学、英国曼彻斯特大学、印度贾达普大学和南非开普敦大学的主管单位为本书的编写提供了开展必要研究的基础设施。感谢 Steven Mair 和他的英国斯蒂夫尼奇 IET 编辑团队。在此特别值得一提的是，责任编辑 Lisa Reading 及 IET 和麦克米伦出版公司的制作团队，还有 Joanna Hughes 和 Lavanya Somasundaravelu 及其团队的不懈努力，使本书尽可能减少印刷上的错误。还要感谢雅典娜出版社有限公司使本书得以按时印刷出版。

同时，感谢工程及建筑环境学院院长 FW Petersen 教授、开普顿大学电气工程系前任和现任系主任 CT Gaunt 教授和 BJ Downing 教授对本书出版的热情关注和不断鼓励。

此外，还要感谢 AK Saha、MK Das、AK Basu、A Sinha 和 RN Lahiri 五位研究员，他们的研究成果充实了本书的附录。更要感谢他们所属的主管单位即 CESC、MERI、CIEM 和 TCS 有限公司为鼓励这些研究员而做出的努力。

最后，衷心感谢朋友和家人给予的支持。

缩 略 语

AC	交流电
ACC	年容量电价
ADS	调度自动化系统
AGC	自动发电控制
AI	人工智能
ATC	可用输电容量
ATS	自动转换开关
BBS	模块-总线-软件
BCCHP	建筑冷热电联供系统
BCU	间隔控制单元
BMU	间隔监控单元
BPU	间隔保护单元
CAD	计算机辅助设计
CAN	控制器局域网络
CB	断路器
CBM	容量效益裕度
CCGT	联合循环燃气轮机
CCS	碳捕获与封存
CdTe	碲化镉
CERTS	美国电力可靠性技术解决方案协会
CHP	热电联供
CIGRE	国际大电网会议
CIRED	国际供电会议组织
CIS	铜铟联硒化合物
CMD	转换器制造数据
CO	一氧化碳
COP	性能系数
CT	电流互感器
DA	配电自动化
DBMS	数据库管理系统
DC	直流电

DCS	分布式控制系统
DER	分布式能源
DES	区域能源系统
DFIG	双馈式感应发电机
DG	分布式发电
DGCG	分布式发电协调组
DISCOs	配电公司
DMS	配电管理系统
DNO	配电网运营商
DO	数字输出
DOE	能源部
DPG	数据处理网关
DRAM	动态读写存储器
DSM	需求侧管理
DTI	英国贸易与工业部
DUoS	电力系统的配网使用
DVR	动态电压恢复器
EPROM	可擦写只读存储器
EMI	电磁干扰
EMM	能量管理模块
EMS	能量管理系统
ESQCR	用电安全、质量和连续性条例
FERC	美国联邦能源监管委员会
FLC	模糊逻辑控制器
FPGA	现场可编程门阵列
GENCOs	发电公司
GHG	温室气体
GOOSE	面向通用对象的变电站事件
GSE	通用变电站事件
GSSE	通用变电站状态事件
GT	燃气轮机
HHI	赫芬达尔-赫希曼指数
HIT	本征薄层异质结
HJ	异质结
HMI	人机接口
HVAC	暖通空调

IC	内燃
IEC	国际电工委员会
IED	智能电子装置
IGBT	绝缘栅双极型晶体管
IMDS	信息监测与诊断系统
I/O	输入/输出
IPM	集成功率模块
IPP	独立发电公司
ISO	独立系统运营商
IT	信息技术
LAN	局域网
LMP	节点边际电价
LN	逻辑节点
LOG	脱网
LP	线性规划
LV	低压
MC	微源控制器
MCFC	熔融碳酸盐燃料电池
MCP	市场出清价
MMI	人机接口
MOV	金属氧化物变阻器
MPPT	最大功率点跟踪
MT	微燃机
MTG	微燃发电机
MV	中压
NEC	美国国家电气规程
NEREC	国家教育研究与评估中心
NFFO	非化石燃料义务
NLP	非线性规划
OASIS	开放存取实时信息系统
Ofgem	英国天然气与电力市场办公室
OSI	开放式系统互联
PAPF	磷酸型燃料电池
PC	个人计算机（台式机）
PCB	印制电路板
PCC	公共连接点

PCM	保护协调模块
PCU	功率调节单元
PEBB	电力电子标准模块
PEI	电力电子接口
PEMFC	质子交换膜燃料电池
P-f	功率-频率
PI	比例积分
PID	比例-积分-微分
PLC	可编程序控制器
PMSG	永磁同步发电机
PSERC	美国威斯康星州电力系统工程技术研究中心
PQ	电能质量
PT	电压互感器
PV	光伏
PWM	脉宽调制
PX	电力交换
RCC	远程控制中心
RES	可再生能源
RIG	远程智能网关
RMS	方均根
ROC	可再生能源义务证书
RTP	实时价格
RTU	远程终端
SC	调度协调员
SCADA	监控与数据采集
SCR	晶闸管
SCU	站内控制单元
SFC	顺序功能图
SG	同步发电机
SLA	服务水平协议
SOFC	固体氧化物燃料电池
SONET	同步光网络
SSTS	静态源转换开关
STATCOM	静止同步补偿器
STC	标准测试条件
SVC	静态无功补偿器

T&D	输电和配电
TC	技术委员会
TCP/IP	传输控制协议/互联网协议
TCR	晶闸管控制电抗器
TES	热储能
THC	总烃
TOU	使用时间
TRANSCOs	输电公司
TRM	输电可靠性裕度
TSC	晶闸管投切电容器
TSR	叶尖速度比
TTC	总传输容量
TVSS	瞬态电压浪涌抑制器
UCA	电力公司通信架构
UPS	不间断电源
VLSI	超大规模集成电路
VPN	虚拟专用网络
VTB	虚拟测试平台
WDI	湿稀释剂注射
WECC	美国西部电力协调委员会
WECS	风能转换系统
WisPERC	美国威斯康星州电力电子研究中心
WSCC	美国西部系统协调委员会

目　　录

《微电网和主动配电网》翻译工作组

序

译者的话

原书序言

原书前言

致谢

缩略语

第1章　分布式发电和微电网的概念 …… 1

1.1　分布式发电 …… 1

1.2　集成分布式发电的原因 …… 1

1.3　主动配电网 …… 2

1.4　微电网的概念 …… 3

1.5　典型的微电网结构 …… 4

1.6　微电网的互联 …… 6

1.7　微电网的技术和经济优势 …… 7

1.8　微电网发展的挑战和劣势 …… 8

1.9　微电网的管理和运行问题 …… 9

1.10　微电网与主电网的动态交互 …… 9

1.11　结论 …… 9

第2章　分布式能源 …… 11

2.1　简介 …… 11

2.2　热电联产系统 …… 11

2.3　风能转换系统 …… 21

2.4　太阳能光伏系统 …… 23

2.5　小型水力发电 …… 25

2.6　其他可再生能源 …… 26

2.7　储能设备 …… 26

2.8　结论 …… 26

第3章 微电网的影响 …… 27

3.1 简介 …… 27
3.2 热能利用的影响 …… 28
3.2.1 热能供应 …… 28
3.2.2 吸收式制冷机 …… 29
3.2.3 除湿设备 …… 30
3.2.4 热能存储 …… 30
3.3 对过程优化的影响 …… 30
3.3.1 HVAC系统的优化 …… 31
3.3.2 电能质量 …… 32
3.3.3 电力成本考虑事项 …… 33
3.3.4 输电拥堵成本 …… 33
3.3.5 微电网成本的基本考虑事项 …… 33
3.4 对市场的影响 …… 34
3.4.1 电力市场中的可能性 …… 34
3.4.2 天然气市场及其困境 …… 35
3.4.3 必要的市场改革 …… 35
3.5 对环境的影响 …… 36
3.6 对配电系统的影响 …… 37
3.6.1 辅助服务 …… 38
3.6.2 微电网引起的配电系统问题 …… 40
3.7 通信标准和规约的影响 …… 41
3.7.1 规约、通信程序和网关 …… 41
3.7.2 备选通信 …… 42
3.8 结论 …… 42

第4章 微电网和主动配电网管理系统 …… 44

4.1 简介 …… 44
4.2 微电网的网络管理需求 …… 44
4.2.1 微电源发电控制 …… 45
4.2.2 家庭过程控制 …… 45
4.2.3 能量存储 …… 46
4.2.4 调整及移峰填谷 …… 46
4.2.5 辅助服务 …… 47
4.3 微电源控制器 …… 47

4.4 中央控制器……50
4.4.1 能源管理模块……50
4.4.2 保护协调模块……53
4.4.3 中央控制器运行所需的信息……55
4.4.4 中央控制器的控制策略设计……57
4.5 结论……59

第5章 微电网的保护……60

5.1 简介……60
5.2 孤岛运行：与主电网隔离……61
5.3 独立微电网的主要保护问题……65
5.3.1 微电网配电系统保护……66
5.3.2 微电源保护……68
5.3.3 NEC对配电变压器保护的要求……70
5.3.4 中性点接地要求……71
5.4 结论……74

第6章 电力电子接口……76

6.1 简介……76
6.2 背景……76
6.2.1 标准计算机体系架构……77
6.2.2 超大规模集成电路……77
6.3 电力变换器的发展趋势……77
6.3.1 自定义设计和制造……78
6.3.2 功率模块的集成和组件封装……78
6.3.3 电力电子积木……78
6.3.4 封装框架设计……78
6.4 模块-总线-软件框架……79
6.4.1 集成模块的模块化组件……79
6.4.2 连接总线……81
6.4.3 高级软件设计环境……82
6.5 BBS框架问题……83
6.5.1 模块化……83
6.5.2 尺寸比……83
6.5.3 寄生电感……83
6.5.4 交叉耦合和负载……83

6.6 结论 …… 84

第7章 SCADA 和主动配电网 …… 85

7.1 简介 …… 85
7.2 现有的 DNO SCADA 系统 …… 85
7.3 DNO SCADA 系统的控制 …… 86
7.3.1 集中式 SCADA 系统 …… 86
7.3.2 分布式 SCADA 系统 …… 86
7.4 微电网中的 SCADA 系统 …… 87
7.5 人机界面 …… 87
7.6 硬件组件 …… 88
7.6.1 远方终端 …… 88
7.6.2 可编程序控制器 …… 89
7.6.3 主站和人机界面计算机 …… 90
7.6.4 SCADA 通信基础设施 …… 90
7.7 SCADA 的通信发展趋势 …… 91
7.8 分布式控制系统 …… 91
7.9 变电站的通信标准化 …… 92
7.10 SCADA 通信和控制体系结构 …… 93
7.11 通信设备 …… 93
7.12 SCADA 和通信的关注点 …… 94
7.13 结论 …… 96

第8章 分布式发电并网对电能质量和可靠性的影响 …… 97

8.1 简介 …… 97
8.2 电能质量扰动 …… 98
8.2.1 暂态 …… 98
8.2.2 电压暂降和暂升 …… 98
8.2.3 过电压和欠电压 …… 99
8.2.4 停电 …… 99
8.2.5 谐波畸变 …… 100
8.2.6 电压缺口 …… 100
8.2.7 闪变 …… 100
8.2.8 电气噪声 …… 101
8.3 电能质量敏感的用户 …… 101
8.4 现有电能质量改善的技术 …… 102

8.4.1 备用电源技术 …… 103
8.4.2 功率调节技术 …… 103
8.5 分布式发电并网的影响 …… 106
8.5.1 简单的备用发电方案 …… 107
8.5.2 带有电能质量支持的从分布式发电系统 …… 107
8.5.3 对优先级负荷有电能质量支持的主分布式发电系统 …… 108
8.5.4 对优先级负荷有电能质量支持的软联网的分布式发电系统 …… 109
8.5.5 电能质量环境中有间歇性太阳能光伏的分布式发电系统 …… 109
8.5.6 电能质量环境中有间歇性风力发电机的分布式发电系统 …… 110
8.5.7 采用双回直流母线的超高可靠性方案 …… 110
8.6 分布式发电并网中的优质电力问题 …… 111
8.7 结论 …… 112

第9章 微电网经济性 …… 114

9.1 简介 …… 114
9.2 微电网经济性的主要问题 …… 114
9.3 微电网和传统电力系统的经济性比较 …… 115
9.3.1 热电供应联合优化 …… 115
9.3.2 供需联合优化 …… 116
9.4 微电网出现的经济问题 …… 116
9.5 微电网与主电网之间的经济性问题 …… 117
9.6 微电网经济性：英国案例 …… 117
9.6.1 微型发电 …… 117
9.6.2 监管问题及监管活动 …… 119
9.6.3 微电网发电技术：在英国的经济展望 …… 120
9.6.4 微电网潜在的经济效益 …… 120
9.6.5 微电网经济性未来的发展趋势 …… 121
9.7 结论 …… 122

第10章 微电网的市场参与 …… 123

10.1 简介 …… 123
10.2 重组模式 …… 124
10.2.1 电力库模式 …… 124
10.2.2 双边交易模式 …… 124
10.2.3 混合模式 …… 125
10.3 独立系统运营商 …… 125

10.3.1 背景 …… 125
10.3.2 ISO 的作用 …… 126
10.4 电力交易中心 …… 127
10.5 市场出清价 …… 128
10.6 日前市场和时前市场 …… 128
10.7 弹性与非弹性市场 …… 129
10.8 市场支配力 …… 129
10.8.1 垂直市场支配力 …… 129
10.8.2 水平市场支配力 …… 130
10.9 搁置成本 …… 130
10.10 输电定价 …… 130
10.10.1 合同路径法 …… 131
10.10.2 兆瓦—英里法 …… 131
10.11 输电拥堵管理 …… 131
10.11.1 输电拥堵定价 …… 132
10.11.2 输电权 …… 133
10.11.3 区域间和区域内的输电拥堵管理 …… 133
10.12 微电网在电力市场竞争中的作用 …… 134
10.12.1 零售转运 …… 134
10.12.2 辅助服务 …… 135
10.12.3 整合商的作用 …… 135
10.13 结论 …… 137

附录 …… 139

附录 A 独立运行和并网模式下微型燃气轮机的建模和性能分析 …… 139
A.1 模型描述 …… 139
A.2 模型参数 …… 141
A.3 案例研究 …… 142
附录 B 双馈感应发电机风能转换系统的动态建模与性能分析 …… 147
B.1 模型说明 …… 148
B.2 案例研究 …… 154
附录 C 质子交换膜燃料电池系统动态性能分析软件仿真 …… 155
C.1 PEMFC 发电系统 …… 155
C.2 PEMFC 动态模型 …… 156
C.3 重整装置模型 …… 158
C.4 功率调节单元模型 …… 158

C.5 模型参数 …… 159
C.6 使用 PI 控制器的案例研究 …… 160
C.7 模糊逻辑控制器设计 …… 163
C.8 使用模糊控制器的案例研究 …… 165
附录 D 固体氧化物燃料电池在分布式发电中的应用 …… 167
D.1 SOFC 发电系统 …… 167
D.2 SOFC 动态模型 …… 168
D.3 SOFC 发电系统模型 …… 170
D.4 案例研究 …… 172
附录 E 最大功率点跟踪的独立光伏电站建模和性能评估 …… 176
E.1 光伏建模 …… 177
E.2 多晶硅电池的双二极管模型 …… 177
E.3 光伏阵列建模 …… 178
E.4 案例研究及结果 …… 180
附录 F 微电网电力方案中市场出清价格的设定 …… 185
F.1 微电网参与的市场结构建议 …… 185
F.2 竞价程序 …… 186
F.3 MCP 规则 …… 186
F.4 MCP 的公式 …… 187
F.5 案例研究 …… 189
F.6 对电力市场的影响 …… 193
附录 G 主动配电网中分布式发电机孤岛运行的仿真研究 …… 194
G.1 背景 …… 194
G.2 系统配置 …… 195
G.3 案例研究 …… 197
后记 …… 203

第1章　分布式发电和微电网的概念

1.1　分布式发电

在世界各地，传统电力系统正面临着化石燃料资源逐渐枯竭、能源效率低下和环境污染的问题。这些问题引发一种发电新趋势，即在本地配电电压等级上将非常规或可再生能源发电接入配电网络。这些非常规或可再生能源包括天然气、沼气、风力发电、太阳能光伏电池、燃料电池、热电联产（Combined Heat and Power，CHP）系统、微燃机（微型燃气轮机，Microturbine）和斯特林发动机（Stirling Engine）等。这类发电技术称之为分布式发电（Distributed Generation，DG），相应的能源称之为分布式能源（Distributed Energy Resources，DER）。“分布式发电”的概念区别于传统的集中式发电。配电网因集成了分布式电源而变得主动，故被称为主动配电网（Active Distribution Network）。

在20世纪90年代后期，国际大电网会议（International Council on Large Electric Systems，CIGRE）和国际供电会议组织（International Conference and Exhibition on Electricity Distribution，CIRED）工作组对有关分布式发电（DG）的重大问题开展了广泛的调查研究，并在其总结报告中进行了阐述。

一些国家根据发电厂额定容量和发电电压等级对DG的严格定义在全球范围内是适用的。尽管DG的定义不同，但对电力系统的影响通常是相同的。根据多项研究成果，普遍接受的DG共同属性如下：

(1) 不由电力公司集中规划和调度。

(2) 容量通常小于50MW。

(3) 电源或分布式发电机通常接入配电系统，典型的电压范围为230/415V到145kV。

本书主要讨论分布式发电（DG）系统的概念、技术特征、运行和管理问题、经济可行性、DG系统在未受监管环境中的市场参与，以及在微电网和主动配电网架构下集成分布式能源（DER）的广阔前景。

1.2　集成分布式发电的原因

尽管传统电力系统具有若干优点，但以下这些技术、经济和环境的效益已引领DG系统逐步发展和集成：

（1）由于负荷的快速增长，传统发电方式的增长需求导致化石燃料储备的持续消耗。因此，大多数国家都在寻求非常规能源或可再生能源作为替代能源。

（2）减少环境污染和全球变暖是促使可再生能源代替化石燃料的一个关键因素。作为《京都议定书》的一部分，欧盟和其他许多国家正计划削减温室气体（碳和氮的副产品）的排放，以应对气候变化和全球变暖。因此，这些国家正在制订新能源发电和利用的政策，以支持新能源的合理利用，希望通过分布式能源的开发生产环保清洁的能源来减少对环境的影响。

（3）分布式发电（DG）为利用余热服务于工业/家庭/商业而建立热电联产、冷热电三联产提供了更好的发展空间。这不仅提高了发电厂的能源利用效率，而且减少了对环境的热污染。

（4）由于能量密度较低和对地区地理条件的依赖，分布式能源（DER）一般都是小容量的模块化单元，因此分布式能源在地理上分布很广且通常靠近负荷，这就要求发电厂在技术上和经济上是可行的。例如，热电联产电厂必须建在非常靠近热负荷的地方，因为远距离输送余热是不经济的。这样就更容易找到厂址，并有助于缩短施工时间和降低投资成本；负荷和电源在物理上的接近也能降低输电和配电（Transmission and Distribution，T&D）损耗。因为分布式能源以低电压（Low Voltage，LV）发电，它可以独立接入配电网络或以微电网形式互联，这种微电网又可以作为独立的半自治实体接入电力公司的主电网。

（5）DER 的独立运行或并网运行有助于增加发电能力，从而全面提高电能质量和供电可靠性。此外，配电网的开放环境和接入机制也为 DG 的集成提供了更多的机会。在一些国家，DG 提供的燃料多样性被认为是有价值的。而在一些发展中国家，由于电力严重不足而鼓励任何形式的发电以满足负荷需求。

1.3 主动配电网

电网正处在一个从单向电力传输的稳定被动配电网（Passive Distribution Networks）向双向电力传输的主动配电网过渡的时代。没有任何 DG 机组的配电网是被动的，因为在配电网中用户的电力均由国家电网系统提供。当 DG 机组接入配电网后，配电网中流动的双向潮流使其成为主动配电网。要对这种过渡产生影响，发展中国家应重视可持续电力基础设施的发展，而发达国家应采取技术和经济上的措施以应对配电网转变带来的挑战。英国工业监管机构——天然气和电力市场办公室（the Office of Gas and Electricity Markets，Ofgem）已将这一挑战称为“英国再布线（Rewiring Britain）”。主动配电网需要在分布式智能系统中引入灵活的智能控制。为了利用可再生 DER 的清洁电力，主动配电网也应采用引领智能电网或微电网发展的未来网络技术。

DG 现行的“即装即忘”（fit-and-forget）策略在主动配电网管理中需要改变，

这种改变应将配电网中DG的集成与需求侧管理相融合。这已经被英国分布式发电和可持续电能中心（the UK-based Centre for Distributed Generation and Sustainable Electrical Energy）（www. sedg. ac. uk）所证实，与无主动管理应用的配电网相比，主动配电网管理方法的应用能够大大支持更多DG的接入。

英国贸易与工业部（Department of Trade and Industry，DTI）和天然气与电力市场办公室（Ofgem）的多份报告清楚地指出智能主动配电网已经获得发展动力。许多因素是主动配电网发展的推动力，例如：①用户期望获得更高的配电网电能质量；②政策制定者对接纳带有储能设备的可再生DER的期望不断提升；③承诺到2050年减少50%的碳排放；④鼓励配电网运营商（the Distribution Network Operators，DNO）通过延缓更换老旧资产，以更好地实现资产利用和管理。

为了实现主动配电网灵活和智能的运行与控制，有必要开展广泛的研究。这些研究关注的焦点主要在以下方面：①广域主动控制；②自适应保护与控制；③配电网管理设备；④实时配电网络仿真；⑤先进的传感器和测量；⑥分布式普适通信；⑦基于智能方法的知识提取；⑧设计新颖的输电和配电系统。

1.4　微电网的概念

微电网是一个小规模的热电联产低压（LV CHP）供电网络，为一个小的社区供应电力或热负荷，例如住宅区或郊区，或者诸如大学或学校的一个学术或公共社区，一个商业区、工业园区、市场贸易区或市政区。微电网本质上是一个主动配电网，因为它是DG系统和不同负荷在配电网电压水平上的联合体。集成在微电网中所用的发电机或微能源通常是可再生或非常规的DER，集成在一起以配电电压发电。以运行的观点，微电网必须配备电力电子接口（Power Electronic Interface，PEI）和控制装置来提供所需的灵活性，确保微电网作为一个单一集合系统运行，并维持规定的电能质量和能量输出。微电网控制的灵活性应使其自身相对于主电网系统而言成为一个独立的可控单元，以满足当地能源供应的可靠性和安全性。

微电网和传统电厂之间的关键区别如下：

（1）和传统发电厂的大型发电机组相比，微电网的规模较小。

（2）以配电电压发出的电力可以直接馈送到主电网的配电网络。

（3）微电源通常安装在靠近用户住所的地方，这样可以为用户高效地提供电/热负荷，并且频率和电压波形合格，线损微不足道。

微电网的技术特点使其适合为一些边远地区供电。而如果从国家电网系统为这些地区供电，则要么由于地理条件难以有效利用，要么由于恶劣的气候条件或人为的干扰而频繁中断。

从电网的角度看，微电网的主要优势是可以将其当做电力系统内的一个受控实体，其可以作为单一的负荷集运行。这确定了微电网的可控性，并遵守电网的规则

和规定，而不致影响主电网的可靠性和安全性。从用户的角度看，微电网有利于就地满足其对电/热的供应需求。微电网能不间断供电，改善当地的供电可靠性，减少馈线损耗，提供对当地电压的支持。从环境的角度看，微电网通过利用低碳技术，减少环境污染和减缓全球气候变暖。

然而，在微电网普及之前，为了达到微电网运行的稳定和安全，很多技术、监管和经济上的问题必须要解决。需要关注诸多方面的问题，例如 DER 发电的间歇性和对气候的依赖性、燃料发热量低，以及微电网与主电网的同步运行缺乏标准规范。对此类研究课题需要开展大量的实时和离线研究，且由全球领先的工程和研究机构牵头进行。

1.5 典型的微电网结构

典型的微电网结构如图 1-1 所示。微电网由电/热负荷和微电源组成，并通过低电压（LV）与配电网连接。负荷（特别是热负荷）和电源布置在一起可以减少传热过程中的热损失。微电源有即插即用的特性。微电网由电力电子接口来实现在独立和联网发电运行模式下的控制、计量和保护功能。这些特性还有助于微电网从一种模式无缝过渡到另一种模式。

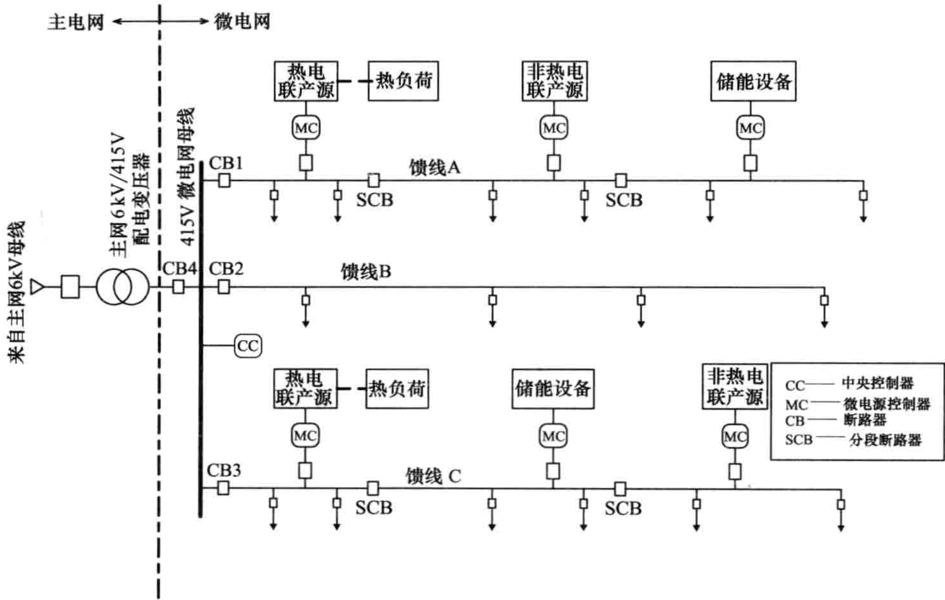


图 1-1 典型的微电网结构

微电网由供应电和热负荷的三条辐射配电馈线（A、B 和 C）、两个 CHP、两个非 CHP 微电源以及储能设备组成。微电源和储能设备通过微电源控制器（Mi-

crosource Controller，MC）连接到馈线A和C。馈线A和C上的一些负荷为优先级负荷（例如要求不间断供电），其他则为非优先级负荷。馈线B上只有非优先级负荷。

微电网与中压（Medium Voltage，MV）电网（称为“主电网”）的连接按照标准接口规定，通过公共连接点（Point of Common Coupling，PCC）断路器CB4实现。整个微电网按选定的运行方式与主电网的连接和断开都由CB4控制，而馈线A、B、C必须通过操作断路器CB1、CB2和CB3来分别连接和断开。馈线A和C上的微电源被设置在离微电网母线较远处，以确保减少线损、电压波形良好和最佳余热利用。当几个微电源共同连接在一条辐射馈线上而非发电机母线上时，尽管沿径向馈线的潮流和电压波形控制相当复杂，该结构仍有必要利用微电源的即插即用功能。

微电网有两种运行模式：①联网模式；②独立模式。在联网模式下，微电网与主电网保持全部或部分连接，从主电网输入或输出电力。一旦主电网中出现任何扰动，微电网就转换到独立模式，并且保证对优先级负荷的供电。这可以通过两种方式实现：①断开CB4，整个微电网解列；②断开CB1和CB3，切断馈线A和C。对于方式①，微电网将作为一个自主系统运行，全部微电源对馈线A、B和C上的负荷供电。而对于方式②，馈线A和C只对优先级负荷供电，馈线B则留待穿越扰动。

在不同模式下，微电网的运行和管理均通过当地的微电源控制器（MC）和中央控制器（Central Controller，CC）来控制和协调，它们的功能如下：

（1）微电源控制器 微电源控制器的主要功能是独立控制微电源的潮流和负荷端的电压波形，以响应任何扰动和负荷的变化。这里“独立”意味着跟中央控制器没有任何通信。微电源控制器还通过储能设备参与发电经济调度、负荷跟踪/管理和需求侧管理的控制。它必须确保每个微电源迅速发电以对在独立模式下其分担的负荷供电，并且能在中央控制器的帮助下自动返回到联网模式。微电源控制器最重要的特点是能对与附近微电源控制器数据无关的本地监控电压和电流做出迅速响应。该控制特性使微电网可作为即插即用设备，并有利于在微电网中任意位置增加新的微电源而不影响现有单元的控制和保护。微电源控制器的另外两个主要特点是，一个微电源控制器不会与微电网中其他微电源控制器单独交互动作和超越中央控制器的指令，而这对其微电源来说是很危险的。

（2）中央控制器 中央控制器通过微电源控制器对微电网进行总的运行控制和保护。其目标是：①通过功率-频率（P-f）和电压控制维持负荷端的电压和频率；②确保微电网的能量优化。中央控制器还进行保护协调，为所有的微电源控制器提供电力调度和电压整定点。中央控制器一般运行在自动模式下，在需要时可提供手动干预。中央控制器有两个主要功能模块：能源管理模块（Energy Management Module，EMM）和保护协调模块（Protection Co-ordination Module，PCM）。

1）**能源管理模块**（EMM）。EMM 为每个微电源控制器的有功和无功功率输出、电压和频率提供整定点。此功能通过最先进的通信和人工智能技术协调实现。整定点的值根据微电网的运行需要决定。能源管理模块（EMM）必须考虑到：

① 微电网供应用户满意的热、电负荷。

② 微电网按照与主电网事先的运行合同条款运行。

③ 微电网满足其遵守最小化系统损失、温室气体和颗粒物排放的强制性要求。

④ 微电网以其可能的最高效率运行。

2）**保护协调模块**（PCM）。PCM 以某种方式响应微电网和主电网的故障及脱网（Loss of Grid，LOG），以确保微电网正确的保护协调。它能适应从联网模式到独立模式转换过程中故障电流水平的变化。为实现这一点，PCM、微电源控制器和上级主电网控制器要有适当的通信。对于主电网故障，PCM 将微电网立即转换到独立模式，以保持在相当低的增量成本下对优先级负荷的供电。然而，对于一些小故障，PCM 允许微电网在联网模式下继续运行直至故障消除。此外，如果电网故障危及了微电网的稳定，PCM 会完全断开微电网与主电网负荷（即馈线 B）的连接，尽管在这种情况下，微电网的利用率会因电力输出的减少而降低。如果故障发生在微电网馈线（即馈线 A 或 C）部分上，则将切除尽可能小的馈线区来维持健康的馈线部分的运行。带有母线电压支持的低频和欠电压保护方案通常用于保护敏感的负荷。借助合适的重合闸方案，PCM 还有助于微电网在转换至并网发电模式的初始阶段后与主电网重新同步。

中央控制器在联网模式的功能如下：

1）采集微电源和负荷的信息进行监测系统诊断。

2）利用采集的信息进行状态估计与安全评估、发电经济调度、微电源有功与无功功率控制以及执行需求侧管理等功能。

3）维持合同条款规定的功率交换情况下，确保与主电网的同步运行。

中央控制器在独立模式的功能如下：

1）为保持负荷端的频率和电压稳定，执行微电网有功与无功功率控制。

2）采用带储能设备支持的需求侧管理的负荷中断/减载策略，维持功率平衡和母线电压。

3）初始化当地的黑启动，以确保改善服务的可靠性和连续性。

4）在主电网供电恢复且对两个电网的稳定性均无影响的情况下，把微电网转换到联网模式。

1.6 微电网的互联

由于微电网被设计为以配电电压等级发电并附带利用余热，故其限制了能量处理能力。按照 IEEE（Institution of Electrical and Electronic Engineers，美国电气与电

子工程师学会）的建议，微电网的最大容量通常被限制在大约10MV·A。因此，几个微电网有可能通过同一个配电网为一个大负荷包（a large load pocket）供电，把负荷包分成几个可控的负荷单元，每个单元由一个微电网供电。通过这种方式，微电网可以互联形成更大的电力库来满足大容量电力（bulk power）需求。对于微电网互联，每个中央控制器在执行控制时必须与邻近的中央控制器密切协调。因此，互联的微电网支持分布式的控制结构，可以实现更高的稳定性和可控性，其还有更多的冗余确保更高的供电可靠性。

1.7 微电网的技术和经济优势

微电网的发展对电力能源产业有相当大的促进作用，原因在于如下优点：

(1) 环境问题 毋庸置疑，微电网比常规的大型火电厂对环境的影响更小。但必须指出的是，火电厂成功的实施碳捕获和存储（Carbon Capture and Storage，CCS）计划将大大减少对环境的影响。尽管如此，微电网在环境问题上仍有以下优势：

1）由于对燃烧过程的严格控制，气体和颗粒物排放减少，最终可有助于应对全球变暖。

2）用户与微电源的直接接触，有助于提高用户合理使用能源的意识。

(2) 运行和投资问题 减小微电源和负荷之间的物理和电气距离，可以有助于：

1）改善整个系统的无功支持，从而改善电压波形。

2）减少输配电馈线的拥堵。

3）减少约3%的输配电损失。

4）通过适当的资产管理，减少或延迟在输电和发电系统扩展中的投资。

(3) 电能质量 基于以下原因实现了供电质量和供电可靠性的改善：

1）分散供电（Decentralization of Supply）。

2）更好地匹配供应和需求。

3）减小大规模传输和发电中断的影响。

4）通过微电源的黑启动运行，最小化故障停机时间和增强恢复过程。

(4) 成本节约 微电网可实现以下成本节约：

1）一个显著的节约来自于热电联产（CHP）运行模式下的余热利用。此外，热电联产源位于接近用户负荷的地方，热传输不需要大量的基础设施。与传统电力系统最大40%的能源效率相比，微电网总的能源效率超过80%。

2）多个微电源的集成也会影响到成本节约。由于它们是布置在当地的即插即用模式，大大降低或消除了输电和配电成本。当组合成微电网时，产生的电力可以分配给本地用户，这又减少了从主电网较长馈线上输入、输出电力的需要。

(5) 市场的问题 在市场参与的情况下具有如下优点：

1）制定由市场驱动的微电网运作程序，将显著降低现有发电公司的市场支配力。

2）微电网可用来提供辅助服务。

3）模块化即插即用的微电源的广泛应用，可有助于降低电力市场的能源价格。

4）配电网投资和分布式发电利用率之间适当的经济平衡，有可能使长期电力用户的价格降低大约10%。

1.8 微电网发展的挑战和劣势

尽管具有诸多潜在的优势，微电网的发展仍存在一些挑战和潜在的不利条件，综述如下：

(1) 分布式能源成本高 安装成本高是微电网的一个极大劣势。这可以通过政府机构安排某种形式的补贴以鼓励投资来降低成本，至少在短时期内实施该措施以实现环境和碳捕获目标。全球设定的目标是到2020年可再生绿色发电提高20%，到2050年碳排放减少50%。

(2) 技术上的困难 缺乏控制大量即插即用微电源的相关技术经验。这需要在微电网的管理、保护和控制，微电源的选择、分级和位置确定等方面进行广泛的实时和离线的研究。在这个领域必须开发特定的通信基础设施和通信协议。IEC61850在微电网和主动配电网的通信中正在进行研究并实施推广。然而农村地区缺乏适当的通信基础设施，这是在农村实现微电网的一个潜在缺陷。此外，经济地实现运行模式间的无缝转换仍然是一个主要挑战，因为目前可用的自适应保护重合闸与同步检测的解决方案是相当昂贵的。

(3) 缺少标准 因为微电网是相对比较新的领域，尚无可用的涉及运行和保护问题的标准。不同类型电源的电能质量、微电源集成的标准和协议、其对传统和监管的电力市场的参与度、安全与保护指南等标准都应该制定。诸如G59/1和IEEE 1547那样的标准应该重新评价和修订，以便在微电网和主动配电网中成功执行。

(4) 行政和法律障碍 在大多数国家，没有标准的立法和法规来管理微电网的运行。一些国家的政府鼓励建立绿色能源微电网，但尚未对将要实施的标准法规进行设计。

(5) 市场垄断 如果在主电网意外事故期间允许微电网自主对优先级负荷供电，那么主要的问题是在任何主电网不可用期间由谁控制能源供应的价格。由于主电网将断开且当前电力市场将对能源价格失去控制，微电网将可能利用市场垄断以一个非常高的价格零售能源。因此，需要设计并部署合适的市场基础设施以维持微

电网的发展。

1.9　微电网的管理和运行问题

微电网管理和运行方面的主要问题如下：

（1）为保证电能质量，微电网必须维持短时的有功和无功功率平衡。

（2）在主电网无法供电的地区或在一个大型配电网内联网的模式下，微电网应可以独立运行。微电网运营商应能够在适当的监管框架下选择运行模式。

（3）能量的生产、供应和存储必须根据微电网中的负荷需求和长期能量平衡进行适当的计划。

（4）以计量、控制、保护功能为基础的数据采集与监控系统（Supervisory Control and Data Acquisition，SCADA），应引入在微电网的中央控制器和微电源控制器中。必须通过状态估计功能来制定系统诊断措施。

（5）经济运行应通过发电计划、负荷经济调度和最优潮流运行等措施来保证。

（6）系统安全性必须通过事故分析和应急操作（如需求侧管理、甩负荷、建立孤岛或关闭任何单元）来保持。意外事故情况下的发电经济调度应该注意系统负荷和负荷端的电压/频率。

（7）发电和负荷之间临时的平衡失调应通过适当的负荷预测和需求侧管理来缓解。负荷转移可有利于使需求曲线变平缓，从而减少备用容量。

（8）对于总的能量管理、保护和控制，适当的通信基础设施和通信规约必不可少。最有可能使用的是载波通信和 IEC 61850 协议。

1.10　微电网与主电网的动态交互

微电的网容量相当小，当其连接到主电网时不会影响主电网的稳定。但在未来，当分布式能源（DER）高度渗透的微电网越来越普遍时，对主电网的稳定性和安全性将会有显著的影响。这种情况下，在两种电网的运行和管理中，微电网与主电网之间的动态交互将是一个关键问题。然而，截至目前，由于 DER 在微电网中主要是为了确保在小负荷包中的当地能量平衡，DER 的渗透对主电网的影响可能很小。但是，微电网的设计需要适当地考虑与主电网之间的动态影响，以便整个系统的整体稳定性和可靠性有明显的改善。

1.11　结论

微电网通过在低压（LV）和中压（MV）配电网中集成小规模 DER 的方式，可以作为以配电网电压水平进行能源供应的一种替代方法，这有助于电能和热能的

同时生产并就地向用户供电和供热。分离的独立 DER 单元与具备“即装即忘”(fit-and-forget) 策略的现有配电网的传统连接，对主电网的运行特性有重要的动态影响。另一方面，将其集成为微电网（具备智能控制器），能全面提高配电系统的稳定性和安全性。微电网可以作为与主电网同步的自主的孤岛独立运行，其通常连接到主电网，但在主电网有任何扰动的情况下都能与主电网隔离，这保证了用户满意的经济和稳定性能。

从技术上讲，微电网是可控的即插即用微电源和储能设备的一个自主组合，对用户而言其所在的位置和运行效益均最佳。微电源基本为由一组多样化的可控原动机驱动的可再生/非传统的分布式能源，通过需求侧管理将储能设备组合进来，使微电源能够利用自身的微电源控制器灵活运行。基于电力电子技术的微电源控制器通过微电源和储能设备执行必要的就地控制，这有助于维持系统中的能量平衡和电能质量。它们也能够在有/无中央控制器干预的情况下工作，无需重新配置现有的或新的设备即可方便地实现设备的无缝连接、断开连接和重新连接。

微电网的主要特点是，对于主电网，其作为一个具备就地电/热生产能力的电负荷和热负荷的单独可控制单元而存在。先进的电力电子接口提供了微电源和周围交流配电系统为达到用户满意所需的运行灵活性、安全性和可靠性。微电网的结构保证了对主电网的动态影响最小化。微电网也通过减少拥堵、缓解增加生产的迫切需要、提高系统的稳定性、响应负荷的快速变化及保持用户满意的供电质量等令主电网获益。

微电网，作为主动式低压（LV）和中压（MV）配电网，能为主要的电力公司提供大量潜在的收益，提高其运营效率、可靠性和对用户的服务质量。但是大量的技术和监管问题需要认真对待，需要世界各地进行大量的研究和政府干预。

第 2 章简要讨论了通常用于微电网和主动配电网中的几种分布式能源（DER）技术的基本运行原理。详细的讨论见参考文献。

第2章　分布式能源

2.1　简介

应用于分布式发电（DG）系统或微电网中的可再生或非常规发电机都被称为分布式能源（DER）或微电源。微电网的一个主要目标就是将所有非常规或可再生低碳发电技术和高效热电联产（CHP）系统的优势结合在一起。就这一点而言，基于热电联产的DER通过采集余热促进节能发电，而低碳的DER则是通过生产清洁电力而有助于减少环境污染。未来DER的范围将包括从基于斯特林发动机的微型热电联产（Micro-CHP）系统、燃料电池和微燃机（微型燃气轮机，Microturbine），到可再生能源，如太阳能光伏（Solar Photovoltaic，PV）系统、风能转换系统（Wind Energy Conversion Systems，WECS）、小型水力发电。DER的选择很大程度上取决于气候、地域拓扑（Topology of the Region）以及可用的燃料。在全球微电网研究领域内，也正在研究使用生物燃料以及诸如飞轮电池（Flywheel Batteries）和超级电容器等各种储能技术应用的可能性。大多数国家都提出方案来支持可再生或非常规能源的开发，以兑现对全球碳排放的承诺。

这一章简要描述了以下DER技术：

- 热电联产（CHP）系统
- 风能转换系统（WECS）
- 太阳能光伏（PV）系统
- 小型水力发电
- 其他可再生能源
- 储能装置

2.2　热电联产系统

对微电网应用来说，热电联产（CHP或Cogeneration）系统是最有前景的DER，其主要优点是利用余热节能发电。和化石燃料发电厂不同，热电联产系统就地采集和利用余热为家庭和工业或生产过程供热。所产生的温度范围（100～180℃）不太高的热量也可以用于吸收式制冷机的冷却。电、热、冷同时生产被称为三联产或多联产。

通过采集多余的热量，热电联产系统可以比传统的发电更好地利用能量，其效

率可能超过80%，与之相比，常规电厂的效率约为35%。最有效的方式就是热量本地化利用。如果通过大量隔热管道长距离传输热，总效率会降低，而且这种传输方式是高成本和低效的。另一方面，电可以更低的能量损失传输更远的距离。因此，热电联产系统可位于距离电力负荷稍远之处，但为获得更好的效益，它们必须靠近热负荷。热电联产普遍用于需要大量热负荷的大城镇、医院、监狱、炼油厂、造纸厂和工业工厂的区域供热系统。

研究发现，热电联产相对传统发电和单一供热锅炉减少了35%的一次能源使用量、相对燃煤发电减少了30%的排放量，而相对联合循环燃气轮机发电减少了10%的排放量。

2.2.1 微型热电联产系统

微型热电联产系统通常安装在像家庭或小型商业建筑等的小型场所。它们与较大的热电联产单元的区别不仅体现在其能源生产能力方面，还体现在参数驱动的运行方式上。大多数大型工业热电联产机组以其发出的电为主产品，发出的热作为副产品，但微型热电联产系统以生产出的热为主产品而以发出的电为副产品。因此，微型热电联产系统的能量生产主要由终端用户对热需求来决定。由于微型热电联产系统运行在这样的运行模式和波动的电力需求结构中（如住宅和小型商业建筑），所以发出的电量常常超过需求量。

微型热电联产机组基本上是由微燃机和与其连接的带翼面或磁轴承的单轴、高速（50000~100000r/min）永磁同步发电机组成。它们提供电力电子接口连接电负荷，同时也有自己的热回收系统用于中低温的热萃取。微型热电联产机组可靠、耐用、价廉，可用容量范围为10~100kW。主要的燃料为天然气、丙烷或液体燃料，允许带有较低微粒排放的清洁燃烧。小型生物燃料微燃机也被认为是一种可能适用的设备。

在热电联产机组运行期间，进入的空气通过离心压缩机后压力会升高。压缩后的空气在通过热交换器时温度会升高，被压缩的热空气进入燃烧室和燃料混合并且燃烧。高温燃烧的气体在涡轮机内膨胀扩张，产生机械力，进而驱动永磁同步发电机产生高频电力。高频输出电压使用整流器转换成直流电，直流电压通过逆变器接口转换成频率为50/60Hz的交流电。

微电网通过利用微型热电联产厂具有以下主要优点：

（1）因为电力传输比热传输更易行和更经济，所以微型热电联产厂更适合建在靠近热负荷而不是电负荷的地方。微电网允许热电联产厂以这种能源优化配置达到热量的充分利用。必要时，燃料电池也被用在热电联产厂中，以便更好地利用其产生的热能。

（2）单个单元的产热规模小。因此，微型热电联产厂在选配几个小型热负荷方面具有更大的灵活性。在技术上，微电网可以设计成一个具有或无余热生产装置

的合理系统，以优化组合热和电的生产。尽管微电网具备上述的灵活性，但在适宜的热电联合生产过程中两者不匹配的可能性仍然存在。因此，必须注意加强这种灵活性。

微型热电联产系统主要基于以下技术：

(1) 内燃发动机 [Internal Combustion (IC) Engines]。

(2) 斯特林发动机 (Stirling Engines)。

(3) 微燃机 (Microturbines)。

(4) 燃料电池 (Fuel Cells)。

2.2.1.1 内燃发动机 (IC)

在内燃发动机（内燃机）内，燃料在有/无氧化剂的燃烧室的空气中燃烧。燃烧产生的高温、高压气体膨胀作用于像活塞或转子一样可移动的部件上。内燃发动机不同于外燃式（外部燃烧）发动机，如蒸汽机和斯特林发动机。外燃式发动机利用燃烧过程去加热某单独的工作流体，然后工作流体通过作用于可移动的部件做功。内燃发动机包括间歇燃烧发动机［如往复式发动机、汪克尔发动机（Wankel Engine）和伯克发动机（Bourke's Engine)］，以及连续燃烧发动机（如喷气发动机、火箭发动机和燃气轮机）。

内燃机常用的燃料有柴油、汽油和石油天然气，有时也可以用丙烷气体。对燃料传输部件进行一些改造，那么大部分用汽油的内燃机也可以使用天然气或液化石油气，同样也可以使用液体和气体燃料，如乙醇和生物柴油。根据不同的燃料类型，在气缸中启动燃料燃烧过程时内燃机提供火花点火或压缩点火系统。

2.2.1.2 斯特林发动机

斯特林发动机是一种闭式循环活塞式热发动机，发动机的工作气体永久性封存在汽缸内。传统上归类于外燃式发动机，尽管也可以由非燃烧的能源供热，诸如太阳能、地热能、化学能和核能。斯特林发动机使用一个外部热源和一个外部散热器，此两者中的每一者都维持在有限的温度范围内，并且两者之间有足够大的温差。

斯特林发动机使用固定量的空气、氢气或氦气作为工作流体。在正常的运行中，发动机是完全密封的，没有气体可以进入或离开。因此，不像其他活塞式发动机，斯特林发动机没必要用阀门控制进气量和排气量。斯特林发动机的一个循环经过四个主要过程，即冷却、压缩、加热、膨胀，伴随着做功气体在热交换器的热态与冷态之间的往复运动实现。热交换器的“热”通过与类似燃烧器的外部（主要）热源的接触保持其温度，而热交换器的“冷”通过与类似散热器的外部冷却器的接触保持其温度。气体温度的变化会导致气体压力的相应变化，而活塞的运动又导致气体交替膨胀和压缩。当密封室内的气体被加热时，气体就会膨胀并作用于动力活塞以产生动力冲程；当气体冷却时，压力下降，活塞在回程中做较少的功来压缩气体，这种功的差异产生净输出功率。斯特林发动机基本上有三种类别：α 斯特林

（Alpha Stirling）、β 斯特林（Beta Stirling）和 γ 斯特林（Gamma Stirling）。

对热电联产应用来说，斯特林发动机可以作为经济的产能设备，并结合类似工业生产过程的二次加热应用来利用其热源。对于这种运行模式，斯特林发动机利用了一次（主）热源与加热应用之间的温差。一次热源的热能进入斯特林发动机的加热器并产生机械动力，从发动机加热器排出的余热用来提供二次加热，由发动机产生的机械动力用于生产作为副产品的电能。斯特林发动机的整个工作过程非常有效和经济。

与往复式发动机相比较，斯特林发动机有几个优点。斯特林发动机可以达到80%的高能量转换效率，尽管这受到工作气体和发动机材料性质（如摩擦、热导率、抗拉强度、蠕变和熔点）不理想的制约。与内燃机相比，它们在较低的维护要求情况下通常更节能、更安静、更可靠。但对于相同的额定功率，斯特林发动机在尺寸上比内燃机更大，且需要更高的资本成本。因此，斯特林发动机只能应用在那些主要目标是减少每千瓦时而非每千瓦的资本成本的场合。斯特林发动机的更广泛应用完全取决于适当的成本效益分析。然而，随着对能源价格上涨、能源短缺和燃料燃烧造成的环境污染等问题的关注度的提高，斯特林发动机的优势变得日益显著。它们被用于像泵水和发电等各种各样的应用环境，并利用不适合内燃机的丰富能源，如太阳能、农业废料和生活垃圾，如同热电联产系统那样。

2.2.1.3 微燃机

微燃机作为分布式发电（DG）系统的发电机组和热电联产（CHP）系统的发电机得到广泛普及，目前它们最大的应用前景是作为微电网的微电源。微燃机是小型的简单循环燃气轮机，其典型的输出功率范围为 25 ~ 300kW。用于改进微燃机性能的技术包括回收技术、低 NO_x 排放技术和使用先进材料，如使用陶瓷作为热部件。微燃机可分为单轴式或分轴式单元。单轴式单元是一个带压缩机并与涡轮机安装在同一轴上的高速同步电机。对于这类同步电机，涡轮机的调速范围为 50000 ~ 120000r/min。相反，分轴式的设计采用了转速为 3000r/min 的动力涡轮机，通过一个速度倍增齿轮箱与常规发电机连接。图 2-1 示出的为单轴式微燃机系统，图 2-2 为分轴式微燃机系统。与传统的备用发电机（Backup Generators）不同，微燃机的设计能满足长时间的运行并且只需少量维护。它们可为客户提供基本的负荷需求，或者用于备用、调峰和热电联产。它们可以使用大部分商用燃料，如天然气、丙烷、柴油和煤油，同时也可以使用生物质燃料。

微燃机有以下特点：

（1）尺寸　与其他 DER 相比，尺寸相对较小。

（2）燃料-电能转换　其转换效率可以达到 25% ~ 30%。但是，如果进行余热回收用于热电联产（CHP），能源效率水平将超过 80%。

（3）NO_x 排放　对天然气微燃机而言，NO_x 排放低于 $7 \times 10^{-4}\%$。

（4）运行寿命　它们的设计运行寿命为 11000h，在此区间如有大修服务，寿

命至少可达 45000h。

（5）运行经济性　系统成本每千瓦低于 500 美元。用电成本对包括电网市场都是具有竞争力的替代产品。

（6）燃料灵活性　能够使用替代燃料，如天然气、柴油、乙醇、垃圾填埋气，以及其他生物质衍生液体和气体。

（7）噪声水平　降低了噪声和振动水平。

（8）安装　安装过程较简单。

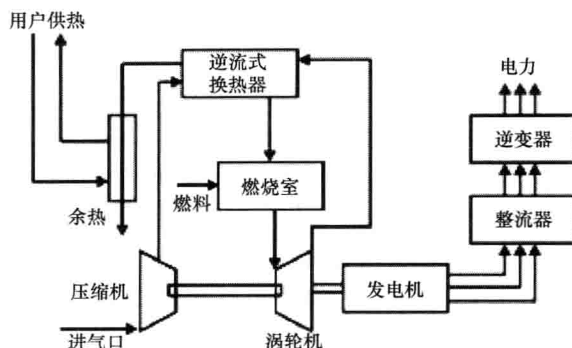


图 2-1　单轴式微燃机系统

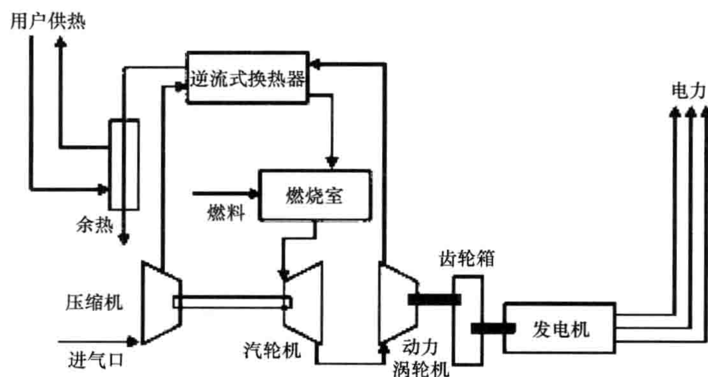


图 2-2　分轴式微燃机系统

一项研究文献的调查显示，微燃机作为分布式发电系统应用有广泛的推动力。对微燃机的应用研究领域包括仿真、离线/实时研究及换流器接口的开发。许多研究文献都是有利用价值的，如用于作为发电机的单级轴流式微燃机的开发，应用相关测试结果对设备的技术研究，在混合动力系统中针对微燃机应用的有源滤波器和自适应控制装置的开发等。研究还包括对微燃机动态模型的开发研究，通过动态模型分析其在孤岛和联网运行模式及热电联产应用模式下的性能。

大多数微燃机使用永磁同步发电机（Permanent Magnet Synchronous Generator,

PMSG）或异步发电机进行发电。人们对与永磁同步发电机连接的微燃机已经进行了充分的研究。然而，关于在孤岛和联网模式下的同步发电机（Synchronous Generator，SG）型微燃机的开发和负载性能分析的报道则微乎其微。这一领域需要进行广泛的研究，以解决使微燃机与主电网一体化运行的技术问题。

同步发电机（SG）与分轴式微燃机连接的主要优点是电力变换器的使用被取消。在这种情况下，发电机通过齿轮箱连接到涡轮机以产生传统50/60Hz的电能。这样，就可以完全免除对整流器和电力变换器单元的需求。此外，使用高速永磁同步发电机（PMSG）时，由于边缘效应和高成本而存在弊端，例如热应力、退磁现象、离心力、转子损耗。虽然耦合感应（异步）发电机经济耐用，但也有弊端，它们的速度依赖于负荷，不使用昂贵的电力变换器系统就不能与电网连接。用于电力变换的电力电子接口在系统内产生了系统谐波，故而降低了输出的电能质量。如果使用带齿轮箱的同步发电机（SG），就可以消除这些谐波。同时，与复杂的电力电子设备相比，齿轮箱是一个更简单的机械装置，其发生故障的几率会更低。然而，使用齿轮箱的主要缺点是，它要消耗部分发出的电力，从而降低了系统效率。一些制造厂商，如Ingersoll-Rand Energy Systems、Ballard、Bowman和Elliott等公司，正在使用带有微燃机的同步发电机进行独立和联网运行。微燃机的主要部件和功能如下：

（1）涡轮机 高速单轴式或分轴式燃气轮机。

（2）交流发电机 在单轴式单元中，交流发电机与涡轮机直接连接。转子是两极或四极固定设计，定子是传统的铜绕线设计。在分轴式单元中，传统的异步发电机或同步发电机通过齿轮箱安装在涡轮机上。

（3）电力电子部件 在单轴式发电机中，把交流发电机产生的高频（1500～4000Hz）交流电压通过电力电子接口变换成标准的工频电压。而在分轴式发电机设计中，由于有齿轮箱而不再需要这些变换。

（4）换热器 换热器回收余热以提高微燃机的能源效率。在排出的空气进入燃烧室之前，换热器将废气中的热量转移到这些排出的空气中，这样就减少了用于把排出的空气温度提高到期望值的燃料需求量。因为换热器运行在很高的压力和温度差的条件下，所以其设计和制造过程相当复杂。余热可用于水的加热、干燥过程或用热代替电的吸收式空调制冷。

（5）控制和通信 控制和通信系统包括：整个涡轮机控制机构，换流器接口，启动电子设备，仪器仪表和信号调节，数据记录、诊断和用户控制通信。

2.2.1.4 燃料电池

燃料电池将燃料的化学能直接转化为电能。它包括两个电极（阳极和阴极）和存储在一个容器中的电解质。燃料电池的运行与蓄电池类似，不同之处在于反应物和生成物无需存储而是不断地馈入电池中。在其工作期间，富氢燃料和氧化剂（通常是空气）分别供给两个电极。燃料供给阳极，氧化剂供给阴极，两股气流被电极-电解液系统分开。电化学的氧化和还原都发生在电极处且产生电，热和水是

这个过程的副产品。图 2-3 为燃料电池的基本结构。

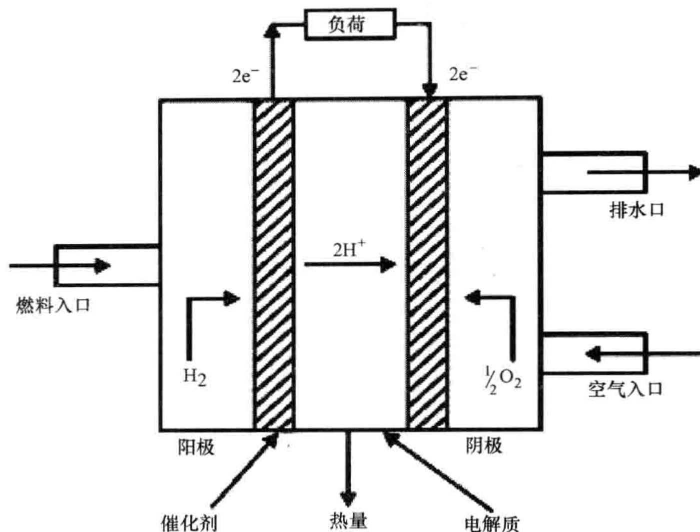
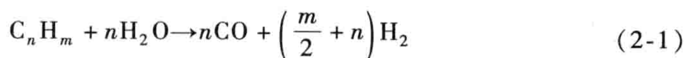


图 2-3 燃料电池的基本结构

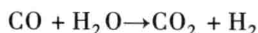
燃料电池有多个优于传统发电机的优点。由于效率更高和燃料的氧化温度较低，燃料电池每发 1kW 的电释放更少的 CO_2 和 NO_x。因此，它们提供了一种环境友好型的能源。因为没有活动部件，它们几乎没有噪声和振动，而且耐用和维护工作量低，这使得它们适合应用于城市或郊区。与燃气轮机和蒸汽轮机不同，燃料电池在不满载的情况下效率更高。此外，它们可以使用多种燃料，如天然气、丙烷、垃圾填埋气、厌氧沼气、柴油、石脑油、甲醇和氢气，这种适用性确保这种技术不会由于燃料不可用而过时。

单个燃料电池的输出电压低于 1V 。因此，为产生更高的电压，把燃料电池相互的顶部堆积在一起，串联形成一个燃料电池系统。燃料电池的电效率在 36% ~ 60%，不同的效率取决于电池类型和系统配置。通过使用传统的热回收设备，燃料电池的整体效率可提高到约 85%。

液体烃（C_nH_m）的蒸汽重整（Steam Reforming）是一种有潜力的为燃料电池提供富氢燃料的方式。这是首选方式，因为氢气的存储相当危险和昂贵。重整装置（Reformer）提供流动的氢气流，而不必使用笨重的高压氢储罐或氢气分装车辆。重整过程中发生有催化剂参与的吸热反应是：



$$C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + \left(\frac{m}{2} + n\right)H_2 \tag{2-1}$$



$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

通过水煤气变换反应，一氧化碳与水蒸气化合产生更多的氢气。图 2-4 示出了燃料电池中物质流动和反应的过程。

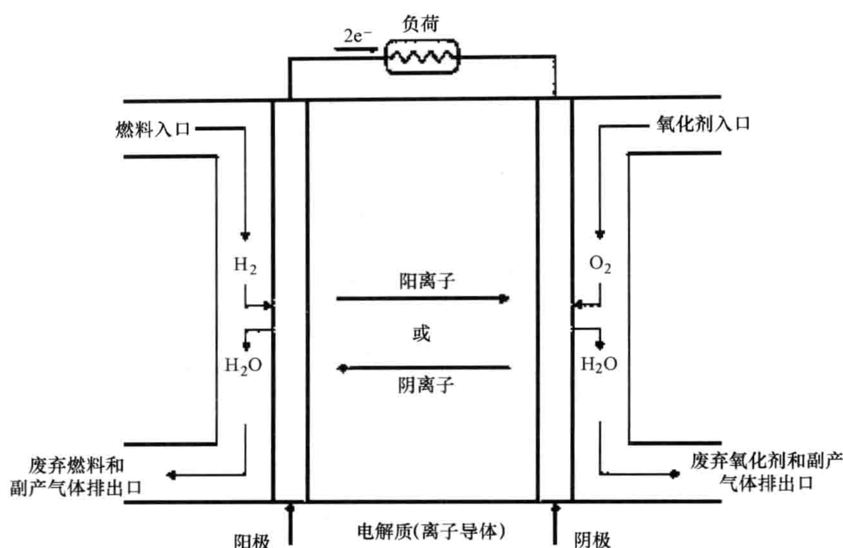


图 2-4 燃料电池中的物质流和反应

尽管存在以下挑战，人们为设计重整燃料电池系统正在进行广泛的研究：

1）蒸汽重整可以利用如乙醇和生物柴油一类的液态烃燃料，但这些燃料不可能有足够大数量以提供连续的氢气流。

2）由于重整反应发生在较高的温度下，所以燃料电池的启动时间长，并且需要昂贵的耐高温材料。

3）催化剂非常昂贵，且燃料里的硫化物可能削弱某些催化剂的作用，这使得催化剂很难用于普通汽油型的系统上。

4）反应产生的一氧化碳可能污染燃料电池膜且可能会降低其性能。在这种情况下，燃料电池系统中必须有复杂的脱一氧化碳系统。

5）此过程的热力学效率取决于氢气产品的纯度，通常介于70%～85%。

燃料电池的类型

根据电解质和工作温度的不同，燃料电池大致分为以下四类：

1）工作温度为80℃的质子交换膜燃料电池（Proton Exchange Membrane Fuel Cell，PEMFC）。

2）工作温度为200℃的磷酸燃料电池（Phosphoric Acid Fuel Cell，PAFC）。

3）工作温度为650℃的熔融碳酸盐燃料电池（Molten Carbonate Fuel Cell，MCFC）。

4）工作温度为1000℃的固体氧化物燃料电池（Solid Oxide Fuel Cell，SOFC）。

（1）质子交换膜燃料电池（PEMFC）

质子交换膜燃料电池的电解质为装在两个铂催化多孔电极中的固体高分子膜，

工作温度由高分子膜的热稳定性和离子电导率决定。为了得到足够的离子电导率，要求质子导电聚合物型电解质为液态的水。由于这个原因，要保持其工作温度低于100℃（即水的沸点）。这使得质子交换膜燃料电池很快即可达到稳态工作条件。质子交换膜燃料电池可工作在高气压（达到8atm㊀）下，高气压条件有助于其从电池堆获得更高的功率密度。固体高分子膜还能承受差别相当大的反应物压力，这为系统设计提供了某些灵活性。

质子交换膜燃料电池工作在由重整碳氢燃料得到的纯氢源条件下。如果重整燃料中的一氧化碳含量超过$50\times10^{-4}\%$，它可能减弱催化剂的作用而造成电池性能的严重退化。所以对所有含碳燃料，必须安装额外的燃料处理系统来除去一氧化碳。

质子交换膜燃料电池的电效率约为50%。但是因为用于燃料重整过程中产生的余热温度过低，整体的系统效率被限制在42%。根据重整过程的类型，质子交换膜燃料电池在所有燃料电池中的电效率可能是最低的。

目前正在开发的质子交换膜燃料电池的总容量在500kW以下。它们正被应用于轻型（50~100kW）和中型（200kW）汽车、住宅楼（2~10kW）和商业楼宇（250~500kW）发电、小型或便携式发电机及电池替换。

(2) 磷酸燃料电池（PAFC）

PAFC的电解液是100%的磷酸。它作为一个传输流体，承载着溶解的氢离子从阳极到阴极以及两个电极之间离子的迁移，从而构成一条电气回路。由于电解液是一种液体，必须小心地注意监视和控制其蒸发和流动。PAFC的电池电极使用铂电极，从而将一氧化碳的排放量按体积计限制到2%。降低电池的性能和寿命的其他因素有：①由磷酸导致的催化剂层的碳载体（Support）和分离器/双极板的腐蚀；②在高温下材料性能的变化导致铂粒子烧结和电解质溢流。堆栈（Stack）冷却和沸水加压同时完成。

PAFC通常工作在200℃左右，加压达8 atm或以下。PAFC的电效率从37%到42%不等。接近200℃的工作温度使PAFC能以热水（60~120℃）或低压蒸汽（约1atm）的形式提供低等级的热输出，这使得PAFC更适合应用在CHP单元中。与其他燃料电池相较而言，PAFC的电效率虽然很低，但对燃料污染物的包容度较高。它们还有巨大的热电联产潜力，可用于需要热、高质量的电或优质电力服务的医院、酒店、学校和商业建筑的现场发电。它们是唯一一种在生产条件下寿命可达40000h或更长的燃料电池，并能在温度为32~49℃的环境中运行。

(3) 熔融碳酸盐燃料电池（MCFC）

MCFC是基于液体电解质的燃料电池。这种电池以平坦的、平面形状堆栈的方式排列。MCFC的典型组成为基于锂钾或钠锂的电解液。碳酸根离子在阴极发生反

㊀ 1atm（标准大气压）=101.325kPa，后同。——编辑注

应后通过电解液迁移到阳极，以完成燃料氧化。由于在阳极产生的二氧化碳是阴极需要的，所以二氧化碳必须从阳极排气口传输到阴极进气口，传输或通过阳极排出的气体与进入的空气混合，或者通过“生成物交换装置”把二氧化碳与排放的其他种类气体以物理方式分离后传送。

MCFC 的工作温度非常高，大约为 650℃，这可使碳氢化合物燃料进行内部转化，从而改善系统设计和效率。此外，高工作温度和快速电极动力消除了对昂贵的贵金属电催化剂的需求，并达到最高电效率（44%）。由于 MCFC 固有的抗一氧化碳毒化的作用，使其可以在不同类型的燃料条件下工作。

然而，由于 MCFC 的高温工作条件，需要昂贵的耐高温和耐腐蚀材料。使用的材料有不锈钢合金、陶瓷复合材料和半导体氧化物材料。由于存在阴极在电解液中溶解、电解质管理和硬件腐蚀等问题，MCFC 的预期寿命会降低。不过，人们正在进行大量的研究以期把电池寿命延长到 40000h。

MCFC 产生高质量的余热，这些余热可以有效地用于燃料加工、热电联产、内部甲烷重整和工业过程。因此，它有望在热电联产应用中争取到市场，如应用在酒店、学校、中小规模的医院、购物中心，同样也可以应用在化学、纸张、金属、食品和塑料等工业领域。

（4）固体氧化物燃料电池（SOFC）

固体氧化物燃料电池由固态电解质和作为电解质层的固体氧化锆陶瓷材料组成。它的工作温度可以高达 1000℃，在所有燃料电池中是最高的。不像 MCFC 和 PAFC，固体氧化物燃料电池的固相设计只需要两相组成（气体和固体），以实现电解质-电极界面中的电荷转移反应。这就免除了腐蚀和电解质管理的问题，从而简化了设计。

在工作过程中，氧化剂进入阴极室，在此电极反应后，氧离子通过电解质层迁移到阳极，氢离子就在阳极被氧化。高工作温度为吸热重整反应提供了足够的热量。因此，固体氧化物燃料电池更能容忍燃料杂质，并且可以使用氢气和一氧化碳燃料直接在阳极工作。它不需要外部重整或催化剂来产生氢气。此特性使得固体氧化物燃料电池对于类似生物燃料和煤炭汽化产品的燃料有特别的吸引力。

当固体氧化物燃料电池与燃气轮机集成为一个系统（SOFC-GT 系统）时，其系统电效率几乎达 70% ~75%，这在所有的燃料电池技术中是最高的。其寿命也是其他燃料电池的 2 ~4 倍，可达 10 ~20 年。固体氧化物燃料电池非常适用于分布式发电系统、热电联产系统和类似的小型便携式发电系统。固体氧化物燃料电池的两种不同结构均有应用，即应用于大容量热电联产和分布式发电系统的管状结构设计，以及小容量发电的平面结构设计（Planar Design）。

由于固体氧化物燃料电池的工作温度高，因此其主要缺点是对电池关键部件材料的要求十分严格。稀有陶瓷、金属陶瓷复合材料和高温合金的使用以及这些材料的制造技术要求在很大程度上增加了 SOFC 的成本。正因为如此，制造商正在试图

把固体氧化物燃料电池的工作温度降低到700~900℃。

2.3 风能转换系统

风能转换系统（WECS）是将风能转化为电能，其主要部件是风力发电机。风力发电机通过多传动比齿轮箱连接到发电机，在WECS中通常使用感应式发电机。风力发电机组的主要组成部分有机塔、转子和机舱，机舱内有传动装置和发电机，转子可能有两个或两个以上的叶片。风力发电机通过桨叶捕集风的动能，然后通过齿轮箱把能量传递到感应发电机侧。风力发电机驱动发电机轴产生电力。齿轮箱的作用是将风力发电机较慢的转速转换成感应发电机侧较高的转速。利用监测计量、控制和保护技术，将发电机输出的电压和频率维持在规定的范围内。风力发电机为水平轴结构或垂直轴结构。在20世纪90年代中期之前，WECS的商用风力发电机的平均容量为300kW，而近期，已开发出容量高达5MW的风力发电机并安装应用。

风力发电机的输出功率取决于几个因素，如风速、风力发电机的尺寸和形状，其产生的功率由下式给出：

$$P=\frac{1}{2}C_{\mathrm{p}}\rho V^{3}A \tag{2-2}$$

式中，P为功率（W）；C_{p}为风能利用系数；ρ为空气密度（$\mathrm{kg/m^3}$）；V为风速（m/s）；A为桨叶扫掠面积（$\mathrm{m^2}$）。

C_{p}给出了对风轮所获取能量总量的度量，其值随风轮设计和叶尖速度比（Tip Speed Ratio，TSR）的不同而变化。叶尖速度比（TSR）是风轮与风的相对速度之比值，实际最大值约为0.4。由于塔影效应、乱流和湍流等引起的风速波动影响，转矩输出经常发生动态变化，这些变化导致输出功率的动态扰动和电压闪变。在恒速风力发电系统中，功率变化和电压闪变会给配电网带来问题。相反，变速风力发电系统提供更平稳的输出功率、更稳定的母线电压和更低的损耗。然而，WECS的主要问题是，由于发电的间歇性和发电设备本身的能量消耗，其声称的净容量小于铭牌容量。

2.3.1 风力发电系统

根据可控性，风力发电系统分为恒速风力发电系统和变速风力发电系统。

2.3.1.1 恒速风力发电系统

恒速风力发电机组几乎以发电机设计和齿轮箱传动比预定的恒定速度进行工作。其控制方案总是瞄准以下目标：通过控制风轮转矩使能量捕集最大化，或者通过调节在大风中的桨距角使功率输出最大化。根据控制策略，恒速风力发电机组又被细分为失速调节风力发电机组和变桨距风力发电机组。

恒速失速调节风力发电机没有任何控制输入选项。风轮叶片被设计成固定桨距并运行在给定风速的最优叶尖速度比附近。当风速增大时，攻角也加大，结果始于叶根的叶片越来越多的部分进入失速区，这样就导致风轮效率降低且限制了功率输出。对这个概念的另一种理解是，通过改变感应发电机的极数或者改变齿轮传动比，风力发电机可以在两个不同的速度下工作。失速调速的主要优点在于简单；然而，其主要的缺点是这些风力发电机除了按设计风速外不能够按实际风速有效捕集风能。恒速变桨距风力发电机通常使用桨距调节进行起动。起动以后，只有风速高于风力发电机额定风速时才对功率进行控制。

恒速风力发电系统有以下优点：

1）有简单、坚固的结构和较高的电效率。

2）部件较少，故非常可靠。

3）因为没有频率变换，所以不会产生电流谐波。

4）与变速风力发电系统相比，资本成本更低。

然而，相对于变速风力发电系统，它们有以下缺点：

1）就空气动力学而言，效率较低。

2）容易遭受到机械应力，噪声较大。

2.3.1.2　变速风力发电系统

典型的变速变桨距风力发电系统如图 2-5 所示。有两种方法用于控制风力发电机运行，即速度变化和叶片桨距变化。通常采用的控制策略为功率优化策略和功率限制策略。

当风速低于额定值时，采用功率优化策略。这种策略通过保持对应最佳叶尖速度比（TSR）的恒定速度来优化能量捕集。然而，如果由于负荷波动引起速度变化并高于标称值时，发电机可能会过负荷。为避免这种情况，类似发电机转矩控制的方法被用于控制速度。当风速高于额定值时，采用功率限制策略。该策略通过改变

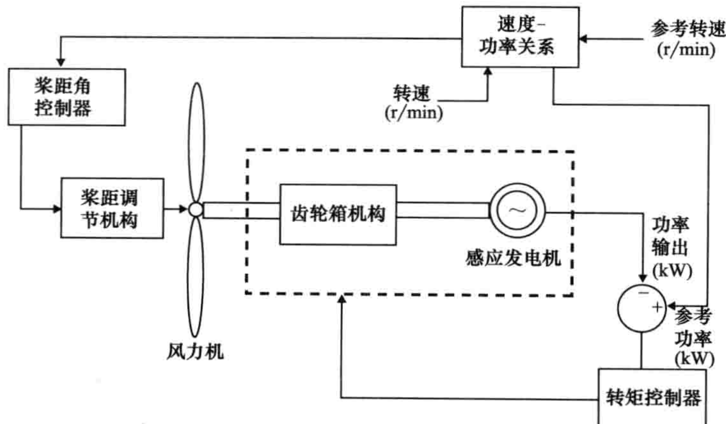


图 2-5　变速变桨距风力发电系统

叶片桨距降低空气动力效率，从而把输出功率限制到额定值。

变速风力发电系统具有以下优点：

1）具有较高的能量捕集能力，承受的机械应力较低。

2）具有较高的空气动力学效率和较低的瞬时转矩。

3）电气系统提供了有效阻尼，所以不需要机械阻尼系统。

4）由于刚性的电气控制，不会遇到同步问题或电压暂降问题。

然而，相对于恒速风力发电系统，它们有以下缺点：

1）电效率较低。

2）更为昂贵，并且有时需要复杂的控制策略。

2.4 太阳能光伏系统

太阳能光伏（PV）发电系统利用免费的、取之不尽、用之不竭的太阳能进行发电。光伏系统的主要优点为：①太阳能作为燃料的可持续性；②环境影响最小；③由于免费获取阳光，用户电费大幅减少；④以最小的维护量可具有超过30年的功能寿命；⑤静音运行。由于这些好处，现今光伏（PV）系统作为有潜力的技术而得到政府、环保组织和商业机构的认可，将以可持续、可再生能源方式成为世界能源需求供应的一个重要组成部分。此外，由于变频技术的广泛改进，现在光伏发电作为以配电电压等级增加本地发电量的首选DER，在全球范围内得到应用。

虽然光伏电池可以作为微电网中的DER得到有效使用，但缺点为安装成本高和能源利用效率低。研究证明，安装小型PV系统比安装大型PV系统具有更好的成本效益比，这表明把PV发电系统直接接入低压配电网络用户的电路效益更好。然而，太阳能光伏以直流（DC）发电的属性，需要采用合适的电力变换器把直流电转换成指定频率水平的交流电（AC）。因此，它们是微电网的潜在参与者。

到达PV电池的太阳能分两部分：直射和散射。由直接辐射获得的直射部分约占85%，散射部分约占15%，通过光线在大气中的分散漫射获得。PV电池的作用相当于一个光敏二极管。以光子形式入射到电池表面的光能量产生的电子-空穴对成为p-n结处的载流子。因此，PV电池所产生的光电流与其表面积、入射光照度和环境温度有直接关系，产生的电压受到穿过p-n结的正向电压降限制。由于单电池的输出电压和电流非常小，所以通常把大量的电池串并联组合起来，以形成更高电压和额定功率的光伏阵列或模块。大部分的光伏模块均配备了最大功率点跟踪（Maximum Power Point Tracking，MPPT）系统，该系统可根据太阳光照度使模块改变工作点，以最大限度地提高功率输出。

2.4.1 光伏电池的类型

PV电池主要有四种不同的类型：①单晶硅；②多晶硅；③薄膜硅；④混合式。

2.4.1.1 单晶硅

单晶硅电池由单一圆柱晶体硅切割的电池组成。单晶硅电池主要的优点是高达约15%的效率，但制造过程复杂且昂贵。

2.4.1.2 多晶硅

多晶硅电池是由熔化和再结晶的硅锭切割的电池制成的。在这个过程中，熔融硅被铸成多晶硅锭，然后把这些多晶硅锭切割成非常薄的晶片再组装成完整的电池。由于制造工艺简单，多晶硅电池比单晶硅电池更便宜。然而，与单晶硅电池相比，其效率较低（约12%）。

厚膜硅是一种多晶硅技术，就是用连续的工艺把硅附着在具有闪闪发光外观的细颗粒的基材上。该电池通常被封装在带有钢化玻璃罩的透明绝缘聚合物内，且限制在坚固的铝框里。

2.4.1.3 薄膜硅

非晶硅电池不是由晶体结构的硅原子而是由薄的同质层硅原子构成。非晶硅比晶体硅能更有效地吸收光线，因此电池更薄。基于这个原因，非晶硅也被称为“薄膜”光伏技术。非晶硅封装在各种各样的基板上，刚性基板和柔性基板均可，这就可以被做成理想的曲面和“折叠式”模块。然而，非晶硅电池比晶体硅电池效率要低，其典型的效率约6%，但它们更易于生产，且成本更低。

其他薄膜：除硅外，其他光敏感材料，如碲化镉（Cadmium Telluride，CdTe）和铜铟硒化合物（Copper Indium Diselenide，CIS）薄膜也可用于薄膜光伏电池。相对于晶体硅技术而言，这种电池具有相对廉价的工业制造过程，而且比薄膜硅模块有更高的模块效率。

2.4.1.4 混合式

即将推出的混合式解决方案，如非晶硅/晶体硅（s-Si：H/c-Si）异质结（Heterojunction，HJ）太阳电池现在越来越普及，主要由于其优异的性能和简单的低温生产过程。混合式电池将单晶硅和薄膜硅混合生产出具有两种技术最佳特性的电池。由三洋集团提出的概念HIT技术（Heterojunction with Intrinsic Thin Layer，异质结与内在薄层）的关键特点是，把内在非晶硅薄层嵌入非晶硅发射极和晶体基底之间，以形成带有异质结与内在薄层的异质结（HJ）太阳电池。由于缓冲层具有优异的钝化性能（Passivating Properties），故而可产生非常高的开路电压和高达17%的模块效率。

表2-1给出了不同类型光伏技术的比较研究数据。

由于英国建筑物的能量使用量占全国使用量的30%以上，英国政府最近承诺用千万英镑鼓励在建筑物上安装光伏系统。在英国，很长一段时间内光伏系统也用于为边远和交通不便地区提供高可靠性的工业用电，或者那些用电量少且使用独立光伏系统比从主电网取电更经济的地区。这样的一些应用包括：①为围绕在英格兰和威尔士的海岸线上的导航浮标、灯塔和近海警示灯船供电；②为农业应用的电池

进行涓流充电；③为类似火车站月台场所的照明系统和电话亭提供电力；④为夏季小村舍和农场建筑物供电。类似输电公司（Transco）的主要工业企业正在使用光伏电力控制系统、数据记录器和自动读取设备。

表 2-1　PV 技术的比较

PV 技术	单晶硅	多晶硅	薄膜硅	混合式
标准测试环境（STC）下的电池效率（%）	16～17	14～15	8～12	18～19
模块效率（%）	13～15	12～14	5～7	16～17
每 kW_p 所需面积（模块）/m^2	7（Sharp）	8（Sharp）	15.5（Kaneka） 16（Unisolar）	6～6.5（Sanyo）
英国每 kW_p 的年发电量（南向倾斜 30°）/（$kW \cdot h/kW_p$）	830	810	800	865
每平方米的年发电量（南向倾斜 30°）/（$kW \cdot h/m^2$）	107	100	50～52	139～150
每 kW_p 的年 CO_2 减排量/（kg/kW_p）	471	460	454	491
每平方米的年 CO_2 减排量/（kg/m^2）	61	57	28	79～85

目前，供水公司正在使用光伏系统为远程监控设备的电池进行涓流充电，而气象局（Meteorological Office）在英国北部已经安装了光伏供电遥感设备。

2.5　小型水力发电

小型水力发电机有效地用于微电网中的就地发电，发电容量取决于一个地区的地形和降水量。这些发电机会遭遇由于雨量不均造成的可变水流而导致的大的发电波动，对本身没有蓄水区和集水流域且为无植被覆盖的、遍布岩石的土壤的水电站来说尤其如此。可变的水源也导致低利用率的波动性发电。利用率被定义为其年度能源可用容量与年度额定容量的比率。水轮机的功率输出由下式给出

$$P = QH\eta\rho g \tag{2-3}$$

式中，P 为输出功率（W）；Q 为水流量（m^3/s）；H 为有效水头（m）；η 为综合效率；ρ 为水密度（$1000kg/m^3$）；g 为重力加速度。

由式（2-3）可看出，通过提高有效水头和增加水流量能提高输出功率。压力管道的作用是把水引到水轮机，合理设计压力管道横截面积可以获得最佳的水流速度。各类水轮机的使用取决于可用水头和单位流量。通常情况下，反击式水轮机工作在较低水头下，如弗兰西斯涡轮机和卡普兰涡轮机（Francis and Kaplan turbines）；冲击式水轮机工作在较高水头下，如佩尔顿轮（Pelton wheels）和斜击式水轮机（Turgo turbines）。反击式水轮机从水的压力降中获取能量，而冲击式水轮机则是从大气压下的水流喷射动能中获取动力。混流冲击式水轮机（Cross-flow Im-

pulse Turbines）用于小型水力发电机组，其动能的获取不是通过喷射状水流而是通过水幕状水流冲击水轮机叶片。带有合适的多传动比齿轮箱的同步发电机和感应发电机都可用于小型水力发电。然而，在水轮机设计中，必须采取适当的预防措施以避免其在突然失去负荷时由于超速而发生损坏。

2.6 其他可再生能源

垃圾填埋气、生物材质、城市垃圾等被视为其他可再生能源用于发电，这些资源的可用性决定了发电机的布局。这些资源的主要缺点是能量密度低、资源不足且难于大量存储。由于资源存储的成本效益低，这些发电机通常容量较小且运行在靠近资源的负荷块。在20世纪90年代后期，英国制定了一项有竞争力的协议——非化石燃料公约（Non-Fossil Fuel Obligation，NFFO），以鼓励应用可再生能源发电。2000年，NFFO计划已经由名为“绿色证书”的支持机制所取代，该机制赋予了电力供应商一些责任，即规定其总发电量中来自可再生能源发电的最低百分比。其他国家也采取了不同的策略，而且政府有时直接干预，以鼓励类似的发电计划。

2.7 储能设备

微电网中必须有备用储能设备以确保不间断供电，这些储能设备有：①蓄电池；②飞轮；③超级电容器。

这些储能设备应连接到微电网的直流母线上，并能在系统状态发生变化时提供穿越能力（Ride-through Capabilities）。

2.8 结论

本章简要探讨了一些分布式能源（DER）技术的基本原理、优点和缺点。读者可以通过参考相关书目进一步了解技术详情。本章对大多数普及的DER都进行了讨论，即热电联产（CHP）系统、风能转换系统（WECS）、小型水力发电、太阳能光伏发电及其他可再生能源。虽然储能设备不是典型的DER，但为了获得微电网利用的最大效益，在适当的需求侧管理中应用若干储能设备是必需的。作者的一些研究成果已作为微电网研究的实例纳入附录中。微电网的主要影响将在下一章中讨论。

第3章　微电网的影响

3.1　简介

微电网作为主电网的负荷和微电厂的聚合单元应运而生。如第1章提及的，微电网设计成小规模、低电压的热电联产（CHP）网络，可以对一小部分用户供电。几个微电网也可以被集合为一个电力库为更大的负荷地区供电。连接到微电网上的微电源要采用如第2章所述的各种各样的低碳发电技术。微电网通常采用两种模式运行：①作为一个自给自足的电力孤岛的独立（Stand-alone）模式；②联网模式，遵循电网的各项规章制度和主电网同步并网。在这两种模式下，微电网都能确保用户和主电网的利益免受损失。微电网对主电网的运行和用户都有非常大的影响。本章专门讨论微电网在技术、经济和环境方面的影响。主要涵盖了电能、热能的产生和使用，以及过程最优化，还有电力和天然气市场。这些市场都在改革完善以适应微电网的要求，从而实现其潜在的环境效益。

在热电联产的微电源中，微电网潜在的收益之一就是余热的有效利用。微电网的能源优化必须处理好热能生产和热能在空调（HVAC）机组、冷却设备、干燥剂除湿装置中高效利用之间的关系，以及热能存储（TES）需求的问题。这可以通过将热产生控制合并到中央控制器上的热过程控制特性来实现。同样，也可以在中央控制器中设置过程优化功能来提高系统的整体效率和可靠性。

微电网对现行的电力市场和天然气市场的影响显著。为充分发挥微电网的效益，应当鼓励市场参与。必须进行适当的市场改革，允许向投资微电网的微电网所有者提供一些市场份额及经济回报。在一些国家，传统的电力市场中已经开始出现重要的转变。

一旦市场参与被确认，微电网将有大量的机会为主网配电系统提供高质量的服务。微电网本身也可以为主网提供许多重要的辅助服务，例如通过无功功率支持来调节电压，用于黑启动的临时性储能和辅助电力等。

现在人们越来越关注全球变暖和环境污染问题，很多国家都在努力按《京都协议书》的要求降低排放水平。根据已经做出的全球碳减排承诺，预计到2050年可以减少50%的碳排放。因此，现在许多国家都专注于建设使用低碳发电机的环境友好型电厂。考虑到要减少发电对环境的影响，那么具有清洁型微电源的微电网就逐渐受到人们的关注和喜爱。为解决污染难题，中央控制器可以适当地编程，在当地净排放引起的污染等级评估出来后对微电源进行调度决策。未来形成的规章制

度相信微电网能有助于持续地减少环境中的温室气体（Green House Gas，GHG）和颗粒排放物。

首先，中央控制器功能的适当发挥需要结构良好的通信标准和规约。本章阐述了为中央控制器建立成本效益优、对用户友好，并且可靠的通信标准、规约和程序的可能性。此外，有关微电网中建筑物冷、热、电联供系统（Building Combined Cooling，Heating and Power，BCCHP）实施的前景也将在本章中讨论。

3.2 热能利用的影响

热电联产（CHP）微电源可以达到非常高的能源使用效率，并且能有效地对当地的热负荷供热。这将大大改善整个微电网的运行效率。然而，微电网需要热能存储（TES）设备来提高对热能的使用效率。本节主要讨论热能在不同类型热负荷中的利用，详述了吸收式制冷装置和干燥除湿装置的有关情况，并讨论了TES的前景和需求。

3.2.1 热能供应

在传统的发电厂中，来自化石燃料大约70%的能量最后都变成余热损失掉，这些余热主要被排放到大气中，从而导致了全球气候变暖。有必要注意，目前在火力发电厂中出现了应用碳捕获和存储（CCS）技术的趋势，这可以将热效率从传统的30%提升到50%。但是，在输电和配电网络中会有8%的额外能量损失。如果可以在用户端进行热电联产发电且余热能就地使用，那么余热所致的能量损失以及输配电的损失就可以大大降低。这将带来非常高的系统效率，并显著减少排放。

余热可以用于热力设备，例如厂房/房间空气加热器、余热蒸汽发生器、余热锅炉、除湿设备、蒸汽涡轮、吸收式制冷设备、液体再热器、热水器、增湿器以及热能存储（TES）系统等。热力设备明细远非本书所述。接下来的章节中要讨论的技术仅仅是在微电网中合理使用热能的构想。研究表明，热电联产（CHP）系统可以带来大约30%的能源使用效率改善，并且有助于获得大约80%的总能效。

从商业角度来看，具有50MW以上联合循环发电容量的大型工业系统可以作为一个独立发电商（Independent Power Producer，IPP）运行。这些公司可以将产生的蒸汽卖给其他公司作为他们的生产用蒸汽。新兴地区能源系统（District Energy System，DES）为热电联产生产的热量提供了一个越来越大的市场。DES是设计用来通过管道网络进行中央厂区到各个建筑物的蒸汽和热水/冷却水的分配，以实现空间加热、空气调节、生活用水加热和/或工业加热等。DES可以安装在大型场所，例如大学、医院、工业园区、办公楼或者居民区。

随着相关市场的发展，一些厂商提出了使用额定容量25kW以上的往复式发动

机、燃气轮机和微燃机的 CHP 系统。然而，对照 50MW 联合循环基荷电厂获得的收益，应对这些小型系统的技术、经济效益及热能使用区域进行精确评估。大型电厂通常将蒸汽供给确定的大型负荷，例如宿舍供暖、石油精炼加热或者食品加工烹饪。另一方面，一些较小的家用型负荷可以由微电网中的热电联产（CHP）微电源为其供热。微电网的典型热负荷可以是家用的水/空间加热器、空调、制冷机或者干燥除湿装置。

微电网的设计和运行理念与大型联合循环电厂相同。对于两个系统而言，产热是第一要务，电力是副产品。联合循环电厂的蒸汽负荷几乎与锅炉大小同时设计。同理，微电网的热负荷理论上与项目规划同时设计。

可能阻碍热能生产市场发展的因素如下：

（1）热力设备比较昂贵且需要采用相对较新的技术。

（2）热力设备不能自我运行，必须通过微电网的中央控制器使其与微电厂协调运行。

（3）热负荷需求可能和微电源运行的最佳时间段不匹配（例如高峰时段）。在此情况下，替代的解决方法就是设立储热装置，但这样一来又会增加成本。

为了将 CHP 微电源成功地组合成微电网，一些国家在尝试开发模块化的或组件式的 CHP 系统。这样的系统主要由一台微型燃气轮机、一台干燥除湿机和一台吸收式制冷机组成。主要考虑让微型燃汽轮机发电并供给附近楼宇，然后排出的余热供给吸收式制冷机和除湿机。从使用的角度看，在空气调节应用上使用 CHP 资源的最大优势，就是空气调节的最高要求和使用电量的最大需求相吻合。

3.2.2 吸收式制冷机

吸收式制冷机使用了一个冷凝器、一个蒸发器和一个热压缩机系统。除了使用热压缩机代替机械压缩机外，其他的都和传统的蒸汽压缩系统类似。这个热压缩机主要由一个吸收器、一台发电机和一个小型泵构成。它把低压制冷剂从吸气端吸入，再把高压制冷剂传送至排气端。高压制冷蒸汽（水或氨）将从压缩机的发生器传递到冷凝器。然后这些蒸汽被冷凝成液体，冷凝的热量排放到大气中。液体制冷剂经过膨胀调节阀可以降低其压力，进而降低沸点。然后低压制冷剂进入蒸发器，并在此汽化过程中吸收流经蒸发器的冷却水蒸气的热量，这样就可以循环冷却。接下来，低压制冷蒸汽将经过蒸发器进入到吸收器。吸收过程发生在吸收器里。作为整个过程的一部分，一种具有相对较强亲和力的吸收剂溶液被加到吸收器中。为了达到这样的效果通常使用溴化锂溶液或氨水。在吸热的时候，低压制冷剂蒸汽和这种强吸收剂逐渐形成一种弱吸收剂溶液。该溶液将被溶液泵送到发生器，并在此加热把制冷剂从溶液里蒸发出来。溶液在降压后重新经过膨胀调节阀引入到吸收器内。然后，高压制冷蒸汽再送到冷凝器里并重复之前的过程。

在弱吸收剂溶液进入发生器和强吸收剂溶液离开发生器之间设置一个液体热交

换器，即可以改善制冷机的工作效率。这种内热恢复机制减少了将制冷剂从溶液里加热并蒸发的热量，从而提高了效率。

3.2.3 除湿设备

除湿设备由一个充满干燥材料的除湿转轮和空气处理与再生回路组成。在运行过程中，在空气进入建筑之前，让空气流经除湿转轮，以带走空气中的水分。这些干燥材料则是通过在除湿转轮旋转时将其暴露于热再生空气流中来恢复它们自身的干燥状态。之后，这些再生空气就可以排放到大气中了。当水分从空气中被带走时会释放热量从而使空气温度上升。热空气需要靠热回收装置来对其进行冷却，传统的空调只能用作最终制冷。因为空气已经比较干燥，最终制冷并不需要太多能量。在某些除湿系统中，带有干燥材料的除湿转轮要不断地对空气进行干燥，并且通过余热气流带走空气中累积的水分。

3.2.4 热能存储

热能存储（TES）技术用于存储热能来满足空调（HVAC）系统或其他生产过程的需求。TES 是一种移峰技术，它使用了各种不同种类的储能介质，例如冷水、冰、易溶盐、凝结物或石头等。借助于移峰技术，TES 的计划和使用可以通过中央控制器得以很好地实现，在高峰期时，根据第二天的电力成本预测和天气预报可以通过中央控制器编程来调度 TES。

传统的方法涉及使用带有 TES 库的空调（HVAC）制冷机来转移高峰时的负荷。因此，当发电量短时降低或是预测到未来几天气温较高时，中央控制器会决定利用电力公司或当地晚上发出的电力为 TES 设备补充能量。而在高峰期间，就可以循环冷却 TES 设备中的流体（通过二次热交换）来满足高峰期的冷却要求。

中央控制器可以根据下面任一个或所有三个存储分级策略来进行编程：

（1）完全存储——此技术可以将由冷却到非高峰时段所引起的空调（HVAC）需求全部转移。

（2）有限需求的局部存储——此方法需要对峰值需求实时控制，并将高峰时的需求减少到根据无冷却负荷预设的需求等级。

（3）负荷调平局部存储——此方法可部分满足对调平负荷需求的冷却需要。

3.3 对过程优化的影响

微电网的中央控制器可以有效地优化 HVAC 系统和生产过程。本节综述了中央控制器在优化这些与（电能质量、电力成本、输电拥堵成本、微电网的基本费用等）相关系统运行方面可能发挥的作用。

3.3.1 HVAC 系统的优化

中央控制器能够用于优化 HVAC 系统的整体效率并提高其可靠性。为此所需的计算应该考虑到 HVAC 系统的冷却装置、泵系统、蒸发器和冷却塔等主要组件的能效值，效率参数用性能系数（Coefficient of Performance，COP）来表达：

$$COP = 热或电力输出/电力或等效燃料值输入 \tag{3-1}$$

性能系数取决于若干因素，例如负荷和湿度。用于空调（HVAC）系统的各种过程的 COP 值通常如下：

（1）所购的天然气转换为有用热能的转换效率≈0.85。

（2）余热转换成有用热能的转换效率≈0.7。

（3）往复式发动机的发电效率≈0.28。

（4）以减少电制冷负荷的吸收式制冷机的效率≈1.0。

（5）电驱动压缩机的空调系统效率≈0.5。

为评估热电联产和非热电联产以及吸收式制冷机技术的不同组合成本，中央控制器需要掌握这些 COP，同时还应该考虑 COP 随周围环境温度的变化。

HVAC 系统的优化运行需要考虑到该设备对峰值负荷的显著影响。因此，为了转移此负荷调峰，商业冷却系统及其中央冷却水工厂应该采用热能存储（TES）。然而，TES 的运行也取决于储能的类型、气候条件、天气预报、运行的温度等，因此储能利用的优化就要求长期进行合同安排和计划热电联产（CHP）微电源的运行。因为上文所述的那些因素，过程优化只能通过中央控制器协调 CHP 源和热力设备的运行来管理。

研究表明，在典型的由购物中心组成的微电网模型里，通过使用热电联产和非热电联产微电源的组合可以节约 65% 左右的总成本。即使①电负荷大约是热负荷的十倍之多，②余热的类型和性质相同，③热电联产电源产生的余热没有被完全利用，这也是可以实现的。只要通过热、电负荷与热电联产系统输出的精确匹配，系统的总能源效率即可提高到 90% 以上。然而，对于拥有不同类型用户的实际热电联产系统，所有与热负荷类型和容量相关的实时信息，如运行温度、流量、距离、压力和效率曲线都应该反馈到中央控制器。这些信息必须不时更新，以计算 HVAC 系统和 CHP 微电源的最优运行条件。

一些研究表明，随着控制理论的日益复杂化，HVAC 系统的能源管理系统难以正常实现其功能。对于手动操作人员而言，正确的理解这些功能变得更加困难。这导致了更先进的控制策略的开发，其中一些被证明在试验上是非常有用的。这样的控制系统被称之为信息监测和诊断系统（Information Monitoring and Diagnostic System，IMDS）。试验期间，带数据可视化软件的 IMDS 安装在试验场所中。操作人员对 57 个测量点、28 个计算点和趋势数据都做了仔细检查，以了解原来的控制和系统的实际工作情况。结果发现，IMDS 可以识别运行中的问题以及重要的节约机会，

还可以提高现有控制系统的利用率。试验表明了数据可视化软件在理解复杂系统运行方面的重要性，试验还强调了在配电公司与建筑 HVAC 系统的协调上微电网优化经济运行的前景。

除了提高 HVAC 系统的能源效率，复杂的控制策略还可用于改善空气质量。空气质量包括温度、湿度和二氧化碳含量。较好的空气质量与空调系统更高的运营成本直接相关，因为在这种情况下，空气要变冷首先得通过控制湿度和每小时换气的次数来控制二氧化碳的含量。当很多人都待在室内产生更高浓度的二氧化碳时，成本将会进一步增加。

人们发现，对于一个大型住宅群或大学校园，通过监测二氧化碳水平和控制空气质量，空调系统的能源成本可能会减少 50% 以上。这样会将建筑的总电能成本减少近 34%。通过为空调系统供电的微电网的中央控制器，可以很容易地控制空气的质量。

3.3.2 电能质量

大多数的电子负载容易受到瞬变电流、电压暂降、谐波、瞬时断电等的侵害。这些被称为电能质量负荷或者 PQ 敏感负荷。因此，电能质量和可靠性都是非常重要的。电能质量是一个相对较新的概念，最近才得到重视。在过去，电压暂降只持续一个或者两个周波就会被忽略，但是现在这将被视为断电。同样，瞬时供电中断、谐波和相不平衡现在也被视为电能质量问题。尽管电能质量问题对工业过程有巨大的经济影响，但是由于多种多样的工业应用和电能质量检测，量化电能质量问题产生的确切成本是困难的。以下是由断电造成的与经济损失直接相关的电能质量问题的几个重要方面：

（1）意外事件的大小和持续时间，如任何高压冲击。

（2）过程中断和设备损坏的性质。

（3）意外事件发生的频率。

（4）意外事件发生的时间，如在生产高峰期或非高峰期。

（5）意外事件发生之前，用户的可预测性和可提前收到通知。

对于上述方面对敏感的办公/制造设备的影响，劳伦斯伯克利国家实验室在美国进行了一些研究。据估计，美国每年由于这类断电造成的损失达 250 亿到 1500 亿美元。

根据用户要求，微电网甚至可按小时计来用以控制当地电能质量。对于电力公司来说，要顾及特定用户对电能质量的特殊要求是相当困难的。传统电力公司通常为给定地区内的所有用户提供同一水平的质量和服务，而不容易满足其不同需求。近年来，一些国家特别关注提高整体的电能质量。澳大利亚正在开发一种特殊的费率结构，奖励通过避免停电而提供更高电能质量的电力公司。不过奖励的额度和结构尚未完善。澳大利亚的监管机构认为，配电公司有责任应对严重的风暴、甩负荷

和发电能力不足等外部意外事件。他们认为，较之个人用户，配电公司能更好地采取措施来降低这些意外事件的风险。这种情况在微电网中可以得到显著地改善，因为连接到微电网的用户可以更有优势获得所要求的电能质量，而无需支付提高电能质量所需的任何额外费用。

3.3.3　电力成本考虑事项

在降低主电网系统扩建成本上，微电网起了重要作用，即通过延迟现有线路和/或新建输电线路增加输送容量的即刻要求来实现。这有助于通过合适的资产管理利用好输电和配电（T&D）资产并使用户绝对获益，因为这一成本已包含在其征收的电费中。在美国进行的几项研究表明，通过减缓电力公司系统扩建的需要，微电网有助于显著地降低电力成本。

3.3.4　输电拥堵成本

通过分散负荷，微电网有助于减少输电网的压力。由于地区间的输电拥堵，用户需要为电力供应支付大量费用。此外，对能源可靠性要求严格的数千个行业常常遭受由于线路超载造成的电力中断而带来的重大经济损失。据能源部报告，在美国，新的输电设施投资远远落后于新的发电和新的电力消费增长的要求，这使得输电拥堵的情况进一步恶化。因此，微电网可能被证明是减少输电线路过载和拥堵的一个潜在的解决方案。

3.3.5　微电网成本的基本考虑事项

通常，微电网可以提供如下的财务收益：

（1）发电成本可以大大降低，这取决于发电机的效率和包括需求收费的当地电力成本。最主要的，这是对基于各种预测未来燃料成本和电力成本的量化，尽管存在一些金融不确定性和风险。

（2）利用热电联产（CHP）微电源可以显著地提高发电效率。

（3）如果允许微电网以合适的税费和按照当地的互联标准将电力输送给主要的电力公司，会为其在电力严重拥堵期间带来显著的财务收益。

（4）现场微电源的性质和微电网独立模式下的运行能力将改善电能质量和可靠性。

（5）在传统的电力系统中，输电和配电的损失在 5% ~20% 之间。通过对微电网中 CHP 微电源的优化配置可以大大减少这些损失。这将缓解在微电网站之间敷设长距离馈线或对其升级的需求。此外，微电源和负荷之间物理上的接近也可以减少线路损失。

（6）通过使用低碳环保的发电技术，微电网可以显著改善环境空气质量。如果当地的税费、激励制度或法规允许其获得减排额度来替代、减少或者消除主电网

侧的发电废弃物排放，则将会显著地为用户节约成本。

(7) 因为现有的商业发电产品交货期短，所以微电网可以实现快速扩张。

3.4 对市场的影响

为了微电网的成功实施，必须对微电网业主和电力公司采取强有力的财政激励，以促进能源市场向前发展。但是，只有存在一个允许微电网向电力公司提供辅助服务的市场，这些财政激励才能得以实现。这样的市场发展需要进行重要的制度改革，从世界范围来看，有几个地方已经开始进行市场改革，类似电压调节这样的辅助服务已经被某些地区作为实验项目。本节主要讨论现有市场的结构及其薄弱环节、开发微电网服务市场的可能性和必要的市场改革。

3.4.1 电力市场中的可能性

为了促进微电网的市场参与，市场改革应该旨在开发针对发电和辅助服务的市场体系，其价格的变化可以反映出现有系统的状况。这就意味着当系统所受压力增大时，价格就变高；反之亦然。因此，市场价格将会成为控制能源生产的首要因素，而技术因素则排在第二位。

微电网来自于市场的收益将完全取决于对价格信号的响应。如果微电网因为自身经济或技术的制约而未能实现的话，那么它就只能根据自己的内部需求继续运营。这样的制约被认为是违背了微电网的合约，微电网应该尽量避免这样的制约来防止市场波动。交易整合机构和买卖方通常通过整合拥有互补能力的资源来协助系统运营商和微电网业主，如此一来，微电网的中央控制器就可以根据市场的价格信号来调控电力和热能的生产。

应该通过增加发电量和电能储存以及对负荷更多的控制来提高市场机制的灵活性。这样的灵活性最终将有助于投标者在对市场力量进行研究之后做出是否投标的决定。这一过程能够进一步帮助市场优化电力系统，同时可以减少个体投标者的商业风险，以及最小化集中规划与控制。

目前一些商业软件被微电源业主用来进行经济评估。这些工具可以让业主们根据基于实时价格数据的变化率或趸售现货市场价格来安排每小时的发电计划。一些财务分析程序也使用基于经济考量的具体模型。对于这类模型的经济考量有：

(1) 特定场所（Site-specific）条件下涡轮机的性能。

(2) 每日不同时间段内的电力/热负荷需求。

(3) 带有气候数据，用于需求预测的数据库。

(4) 带有天然气和燃油的双燃料结构配置。

(5) CO、氨水和 NO_x 排放评估，包括控制排放的相关费用。

(6) 备用收费的成本。

（7）热能的使用。

（8）避免需求收费，热能价格和排放。

3.4.2　天然气市场及其困境

在许多国家，以天然气为燃料的发电系统的增长给天然气输送系统带来了巨大的压力。这可能使天然气需求增长超过 30%。这样的大幅增长将导致以下严重的后果：

（1）由于需求量增加和供应短缺，天然气的价格将会大幅上涨。

（2）天然气供应需求的增加将给现有天然气输送管道带来过多的压力。

（3）区域内天然气管道网络的大部分容量将用于发电。

（4）在特定地区，由管路中断或压缩机故障等引起的潜在损失将对供电可靠性构成最大威胁。

（5）天然气资源的短缺可能会对天然气发电机的使用可靠性造成负面影响，这可能给系统运行人员带来电气安全问题。

（6）对于垂直一体化的电力公司而言，售电量的下降总是伴随着同等的电力成本的下降。然而，处于缺乏监管环境下的配电公司不能在售电量下滑的情况下有效地降低运营成本。此外，配电公司有一个相对较小的股权回报基数：销售量降低 5% 可以导致实际股权收益下降 50%。

因此，在当前的市场情况下，那些没有天然气供应可靠性保证的天然气发电机的更广泛应用，可能会对一些配电公司造成威胁。

3.4.3　必要的市场改革

在现行市场机制下，零售用户未能感受到供应侧成本的变化，因为这些因素并没有反映在零售价格信号上。然而，除非中央控制器参与电力批发市场，刺激需求侧响应的成本信息才会成为可能。由于市场的情况比较复杂，存在许多使得中央控制器未能对市场状况做出正确响应的原因。其中一些原因如下：

（1）实际批发成本可能不会在零售电价中体现。如果真是这样，微电网可能对电力和天然气成本过于敏感，并对市场力量有巨大的反应。

（2）由于电力批发市场对微电网端没有需求侧响应，中央控制器通常提供一条具有高度弹性的需求曲线。在日前市场中这将是有重要价值的，那里的中央控制器可以引导微电网只根据对第二天的天气和过程计划进行“容量”投标，因而这将仅允许一天的生产和消费计划。

（3）用于对能源供应商分配批发成本的负荷曲线未能考虑实际的服务成本。实际成本相对较低的、较平缓的负荷曲线不反映批发的成本。

（4）现有的市场并不认可用户负荷侧资源作为辅助服务提供者。辅助服务市场尚未建立，在这样的市场中，微电网可以为他们的服务进行投标。

(5) 在批发能源服务定价中并未考虑输电容量的约束。只有当地定价反映了微电厂提供的、在消除现有输电网络拥堵方面的潜在好处。

(6) 辅助服务市场仍处于正在建立的阶段。由于缺乏公平、完善的市场规则，非常难以预测。因此，必须改革价格上限和默认服务的费率，从而反映在不同时间、地点的负荷曲线响应的价值，也有助于创建为现有配网公司提供辅助服务的市场。

3.5 对环境的影响

微热电联产系统和其他低碳发电机可以有效减少有害气体的排放和环境变暖问题。除市场敏感性之外，这是支持微电网运行的主要标准之一。为实现环保运行，应将中央控制器设定为根据最低净排放来进行运行决策，并且也要考虑加入微电源后减少的排放以及来自于微电源的本地排放。

如果将“污染最小化”作为市场响应的（Market-responsive）中央控制器的调度决策中的一个附加标准，这会使决策算法更加复杂。如果在市场体系中加入一个公平、合理的排放税，这种复杂性是可以避免的。在考虑了净排放量的减少后，此税费将对微电源供电量做出合适的估价。在这种情况下，可从价格信号本身得出对净减排量的度量。

通过排放税，可以构建一种时间、季节和位置的组合功能，使得在污染最严重的时间和地点，税费能最具吸引力。这给中央控制器提供了一个使微电源在最低排放下优化运行的信号。在这方面，环境政策激励措施和现行的监管指导也应给予应有的重视。

3.5.1 污染物沉积的最小化

美国环境保护署设定了在环境空气中的六种限制的污染物，即：①二氧化氮；②一氧化碳；③二氧化硫；④铅；⑤臭氧；⑥微粒物。发电厂和公路上的汽车是氮氧化物气体的最大来源，大型汽轮机和往复式发动机在高温下运行也可以产生大量氮氧化物。相反，使用微燃机和燃料电池排放的氮氧化物要低很多，因为其燃烧温度较低，因此，作为这类应用，微电源将大大降低碳和氮的化合物以及总的碳氢化合物（THC）的排放。

微燃机的排放取决于运行温度、功率输出和燃烧过程的控制。要想使排放达到最低，只能借助于对燃烧过程快速和精确的控制。这类控制最好是通过微燃机自身的控制系统来实现，而不是由中央控制器控制。对于微燃机的热能和电力输出，考虑到相对于功率水平和替代排放的排放物产生，中央控制器只需向微燃机提供发电设定点即可。然而在某些应用情况下，中央控制器可能会监控发动机废气中的剩余氧浓度。如果氧浓度比较高，废气可用于下游燃烧器的直接加热或作为空气预热

器。微燃机的制造商通常执行非常严格的控制以使氮氧化合物的产生降到最少，一些燃烧控制方式如下：

（1）湿稀释剂注入法（WDI），即将水或蒸汽注入燃烧区以降低燃烧温度。但是这种方法提高了一氧化碳的排放量，降低了效率并缩短设备的寿命。

（2）借助媒介催化还原，例如废气中的氨气。这个方法价格昂贵，有时会在废气中形成硫酸铵。

（3）使用有贵金属催化剂的催化燃烧机，其允许高的气流率和非常低的压降。

目前正在致力于开发环保经济的调度算法，将氮氧化物、二氧化硫、一氧化碳等空气排放物作为微电源的权重函数。

对于热电联产型微电源来说，通常首要选择的是热能优化，其次才是电力优化，这意味着电力生产依赖于用户对热能的需求。对于大型热电联产系统，其运行约束条件如下：

（1）每小时生产的热量必须等于热量需求。

（2）在这个过程中生产的电能应该用于供应电力负荷，任何额外的电力需求都需要另行购买。

（3）氮氧化物、二氧化碳和二氧化硫排放都必须维持在规定范围内。

根据变量的重要程度，可以通过影子价格来为上述约束条件提供合适的权重因数。影子价格是一个用于量化每个变量重要程度的数学工具，它可能是一个当前实际价格、需求、使用时间和季节的函数。影子价格可能是在发电和供热过程中产生的每类污染物在每小时的基础上制定的。这些通过中央控制器的计算和使用，运用迭代算法达到最优化的经济调度解决方案。

为调度和控制发电机的运行，季节性和区域性（Area-wise）的排放变化应该得到应有的重视，例如，在春末和夏季当环境温度变高时臭氧的排放会上升。由于反应时间很长，臭氧浓度峰值大多显著发生在排放源的下风处。此外，臭氧往往集中在远离城区的顺风的人口稠密地区。因此，在温暖的季节，适合在大型城区内部或附近尽量减少氮氧化物的排放，以减少臭氧的形成，使用热电联产微燃机的微电网能够高效地完成此目标。因此针对特定污染物的产生、替代排放、预计的温度等方面，都应该提供有吸引力的利率激励来控制对环境有害的污染。

3.6　对配电系统的影响

微电网最有前景的方面是其辅助服务能提高现有配电系统的可靠性能力。与传统发电厂不一样，微电网位于离负荷群较近之处，这就使其能比传统的发电厂更适合提供辅助服务。由于集中的发电厂一般离负荷很远，使其对发生在负荷中心的扰动很难进行监控和处理。下面将讨论微电网带来的辅助服务，以及在利用这些服务时会遇到的技术和管理障碍。

3.6.1 辅助服务

典型的垂直一体化电力公司通常都拥有对全部电源的控制与运行、输电系统和配电系统。在垂直一体化的系统里，用户在任何时候都可以自由地用电。无论系统状况如何，电力公司必须在保证电能质量的情况下让用户满意。而在电价不能反映系统的状况下，则用户并不能从成本收益中得到好处，即使他们的行为在某种方式上对电力公司有帮助。不仅如此，用户还要就电力公司因消除电压/频率波动所产生的更高平均成本而支付更多费用。有时大多数用户也会仅因为少部分用户的原因被迫支付更高的费用，即使这并不是他们的责任。除了当供电管理机构向用户提供较少的经济信号来引导能源消费时，这样的垂直系统在用户和供电管理机构之间几乎没有互动，这些经济信号一般为季节性费率、分时电价、需量收费和可中断的费率（Interruptible Rate）。然而，电力行业的重组和放松管制为用户和供电管理机构提供了更大的互动空间。

重组开始于供电侧，现在已逐渐延伸到了负荷侧。从传统上来说，辅助服务是由供电管理机构来提供的。但是，在放松监管的情况下，这些服务可以由供电管理机构和微电网业主提供。这样双方将能够公平地进入到辅助服务的市场中来。最可能的盈利点如下：

（1）因为电能和热能以及辅助服务的市场价格会随着时间显著变化，微电网可以通过以下两种方式实现利益最大化：①精细的市场预测；②在高价格时期，大幅减去自身消费需求后可提供的能源和辅助服务规模。

（2）如果允许微电网在开放、竞争的市场里开展辅助服务，通过从集中电力公司对这些服务进行拆分，将扩大市场的供应，促使电价更低和经济效益更好。

（3）将微电网和系统运营商的市场参与联合起来，因为用户和供应商双方都会帮助提升公正性和促进资源的更好利用。

（4）有功/无功功率消耗了很大一部分的发电量。如果鼓励微电网在配电方面提供这些服务，那么主电网的发电机可将全部容量都用于发电。

（5）在提供辅助服务的时候，小型微电源能比大型发电机对主要的控制请求做出更快的反应。这将会自动地克服通信和控制延迟的问题。

（6）由小建筑物的所有者和经营者构成的设施集合，相对于电力公司的发电机组，是具有更加可靠的辅助服务提供者。这是因为在此情况下的每台设施都为每项服务提供了整个系统需求的一小部分，而任何单独设备的不可用均无足轻重。

（7）虽然集合在微电网中的资源可能会出现共模故障（Common Mode Failures），但是微电网实施冗余比大电厂更简单、更便宜。

（8）每项服务的价格和收益率都由日前市场的控制中心来决定。在成功的情况下，服务将在下一日按预定的价格提供等。热备用正成为一种重要的服务，像保险那样销售，并且微电网为自己的服务收费。

3.6.1.1 无功功率和电压控制

无功功率和电压的控制需要将配电网电压调节在指定的范围内。在一个竞争性的市场中，这类服务的提供大都是开放的。微电网对无功和电压控制的市场参与取决于微电网的大小和其所处的位置。虽然传统上电容器组和电压调节器用于馈线电压调节，但是电容器组提供的无功功率却按电压的二次方下降，这可能会导致电压崩溃。而微电网却可以按控制器的整定值在当地进行平滑的电压调节。在配电网电压骤降期间，微电源因按当地电压信号提供无功功率将更加经济。此外，由当地微电网提供有功和无功功率显著减少了馈线损耗。对电力公司来说，无功功率和电压控制一般计入发电装机容量的成本中。如果微电网提供这种服务，这将有助于电力公司的发电机按其最大装机容量来发电，从而提高整体的发电量。

3.6.1.2 备用供电

微电网可以出售三种辅助服务，即①频率响应旋转备用；②补充备用（Supplemental Reserve）；③在开放竞争的市场中的备用电源。这些服务旨在恢复在任何意外突发情况下发电机与负荷之间的实时能量平衡。在开放的市场中，微电网可以通过出售这些辅助服务来减少负荷或提高发电量。由于这些服务有不同的响应时间和持续时间，只有在适当的通信和控制系统开发完成后才能提供。

(1) 频率响应旋转备用——微电源可以很容易地提供这方面的备用，因为其对系统频率偏差的响应更快，能够在 10s 内提供这项服务，并在较短时间内维持这一服务，直到被补充储备替代（即在 10min 内）。频率响应和补充储备能维持长达 30min 的系统的发电/负荷能量平衡。此时限后，用户必须通过自有的备用或者断开负荷来解决问题。

(2) 补充备用——微电网可以在意外事件发生 10min 之内，通过微电源提供这样的服务来响应系统运营商的要求，事故后可保持长达 30min 的能量平衡，直至备用电源承担负荷。

(3) 备用电源——微电网可以根据系统运营商作出的一些事先安排提供此类供应。系统运营商应根据负荷优先级别的考虑，事先规划如何利用这项服务，以充分保证在一次电源故障期间对优先和非优先级负荷的供电。有时候一些微电网发电机为其他负荷提供备用电源是有益的。30min 的报警时段足够保证备用电源与服务商的设备进行通信，以及响应系统需求。市场价格信号应该贴切反映这项服务的实时成本，以鼓励供应商在需要的时候提供此项服务。在负荷与发电之间能量平衡情况下，实时电价是短暂的，成本变化是动态的。因此，微电网可以在开放的市场中出售这些储备，创造可观的利润，特别是在高价位期间。

3.6.1.3 调频和负荷跟踪

并网的微电网能有效提供调频和负荷跟踪辅助服务以适应临时的负荷变化。

(1) 调频——发电机配备有自动发电控制器（AGC），可以分分秒秒地针对负荷调节发电量，以将规定的系统频率维持在控制范围内。此功能就是所谓的“调

频”。微电源连接到电网同时靠近负荷群，可以高效地提供这项服务，这有助于避免从外部输入电能的物理和经济限制。

(2) 负荷跟踪——负荷跟踪是在线发电设备跟踪用户负荷变化的能力。负荷跟踪和调频之间的主要区别如下：

1) 负荷跟踪的发生需要经过较长时间，不像调频那么快，分对分（Minute-by-minute）就能跟踪到负荷。因此很多发电机都能提供负荷跟踪。

2) 与各用户独立调频的模式不同，各用户的负荷跟踪过程高度关联。

3) 负荷由于受天气影响并具有或多或少相似的日负荷特性，所以容易预测到负荷跟踪的变化。另一方面，用户也可以就即将发生的负荷使用特性变化与控制中心进行沟通交流。因此关于负荷跟踪变化的信息能够通过应用短期预测技术进行有效收集。

根据上述区别可以看出，调频是较负荷跟踪成本更高的一种服务，需要更多的投资在提供高速易控的发电机上。

3.6.1.4 其他辅助服务

来自微电网的其他辅助服务有系统黑启动和电网稳定，下面将简要讨论：

(1) 系统黑启动——黑启动被定义为一个电力系统在一次总体系统崩溃后，未输入任何外部电力情况下重新启动发电的能力。这是在没有外部支持的情况下，至少将电力系统的一个主要部分恢复至正常使用。必要时，系统运行人员可以和经过训练的专业操作人员进行语音通信来开始黑启动。独立的微电网能不费力地为系统黑启动提供电力。黑启动机组应该位于能够使用并能够重启其他发电机的地方。

(2) 电网稳定——微电网能提供给电网稳定的辅助服务。发生在长距离输电系统中的低频振荡，如果不是由于任何发电方面的原因变弱，也会由自然衰减而逐渐消失。如果振荡未受到自然阻尼，就会出现发电机的串级跳闸和输电线路过负荷。微电网能够检测到低频振荡并能提供足够的阻尼。这可以通过由微电源提供与振荡存在180°相角差的电力来实现。如果一大批微电网集成在一起，那阻尼的效果将会更加突出。

在美国西部电力协调委员会（WECC）进行的动态模拟研究表明，分布式能源（DER）的大惯性对输电系统的可靠性有时是有益的，有时是不利的，这取决于相位延迟。因此，应该为DER设计一个合适的控制器来消除DER惯性的不利影响，以提高整个电网的稳定性。

3.6.2 微电网引起的配电系统问题

微电网基本上是多种DER的集合。微电网对配电系统产生的积极影响很大，能够动态响应大范围的当地需求。而且还会对电力公司的运营和保护有重要的影响，因此电力公司、配电网运营商、监管机构和其他利益相关方还在犹豫是否允许DER作为电力孤岛自主运行。这个由于DER渗透而受到严重影响的领域是电网配

电系统的保护协调。传统的过电流保护是为非双向故障电流流动的辐射式配电系统而设计，但是，连接到配电网络的 DER 将单向辐射网络转化成含多电源的复杂网络，这使故障电流流动从单向变为双向。而且，DER 的稳态和动态行为也会影响输电系统的运行。分布式发电并网对现有主电网保护的各种影响列举如下：

（1）馈线误跳闸。

（2）保护装置误动作。

（3）保护盲障（Blinding）。

（4）由于 DER 解列或并列引起的故障水平提高或降低。

（5）意外孤岛。

（6）自动重合障碍。

（7）非同步重合。

技术建议文件 G83/1、G59/1、IEEE 1547、CEI 11-20 指出，在连接 DER 与供电馈线的断路器（CB）跳闸情况下，DER 应该自动地从中压（MV）和低压（LV）的主电网配电网络中分离出来。这是众所周知的反孤岛特性，即 DER 在市场中使用时，逆变器接口所应具备的强制性特性。因为 DER 并未在电力公司的直接控制下，采用反孤岛保护在电力公司的运行要求中被证明是正确的，但却严重损害了 DER 和微电网在改善服务可靠性方面的利益。因此，这些问题必须精确地加以评估并解决，并且 DER 和微电网的市场参与应该允许其为自己争取最大的利益。

3.7 通信标准和规约的影响

本节讨论微电网部件和控制器的通信标准、规约制定以及通信基础设施的相关问题，还讨论了链接不同的设备的通信网关功能，以及在微电网的应用中，开发符合成本效益、可靠和标准化的通信网关的挑战。

3.7.1 规约、通信程序和网关

微电网在独立模式和联网模式下协调运行都需要结构良好且普遍兼容的通信规程。该规程应该履行独立系统运营商（Independent System Operator，ISO）和供电管理机构规定的约束和义务。一般来说，计算机控制系统需要有严格定义的和结构化的通信程序，但在不同的应用之间或管理机构之间可能有所变化。这就是为什么独立系统运营商、本地发电机、热萃取设备以及本地能量管理系统所采用的规程千差万别，以至于它们的组件间不具备任何连通性。因此，制定中央控制器方案的首要问题就是为不同的通信方式提供转换服务。该方案应为所有系统建立公共通信基础。

执行此转换工作的设备称为网关。网关的主要功能是通过信息转换、格式化、路由和信令功能为设备之间提供必要的连接。然而，网关可能在信息交换期间的通

信过程中引入无法确定的时间延迟和其他问题，一些突出的问题如下：

(1) 转换产生的时间迟延不仅是因为转换过程需要时间，也是因为连接的网络可能会有不同的传输速度和不同的媒介访问规则。

(2) 网关被设计成只能通过有限的特定数据。网关通常会为这些数据对设备进行轮询，然后存储一个该数据的本地副本。当这个数据得到请求时，网关根据本地副本而不是当前的数据来准备响应，这就可能导致响应过时和失实的数据，尤其是对大型复杂系统而言。

(3) 网关的存在使问题的解决更加困难，因为在网关连接的两侧需要不同的工具来识别并解析规约。此外，任何错误传输引起的不确定性都可能增加故障排除的难度。由于网关的限制，可能无法访问诊断故障所需的全部数据，这也可能会妨碍故障排除。

3.7.2 备选通信

为了避免网关带来的问题，独立系统运营商对发电机使用的网关执行严格的技术要求。对不同类型的发电服务，加利福尼亚的独立系统运营商（CAISO）执行不同的网关要求。例如，对用于发电机调节或辅助服务的远程智能网关（Remote Intelligent Gateway，RIG）严格要求，而对只用于发电机非自动化调度系统（non-automated Dispatch System，non-ADS）辅助服务的数据处理网关（Data Processing Gateway，DPG），要求则简单宽松得多。自动化调度系统是一个以较慢速度（如以小时为时间帧）向市场参与者发送指令的网关。对于自动化调度系统，独立系统运营商通常提供软件、安全卡及读卡器，而微电网的业主则提供自己的计算机和操作软件。

一般来说，网关的成本与其运行时间帧成正比。对于关键的、实时性应用，采用速率较快的网关，成本比简单的、小时级的网关昂贵得多。更为简单的网关仅是独立系统运营商所提供的运行在本地个人计算机上的软件包。因此，开发中央控制器时应充分考虑网关的技术要求和成本。主要的挑战是标准化的网关必须做到：①可靠且具有成本效益；②允许微电网以更快的时间帧提供辅助服务；③满足标准的电力公司监控和数据采集系统（SCADA）的要求；④确保大范围之间的设备连接；⑤满足电力公司或独立系统运营商和微电网能源管理系统的需求。为确保所有功能、设备和概念都包含在标准化网关中，有必要在这方面制定广泛的规约。

3.8 结论

主电网配电系统应充分利用微电网提供的辅助服务。在未来的配电系统中，更快地控制将由现地微电源控制器（MC）提供，而较慢的输电和网络管理控制将由独立系统运营商（ISO）提供。MC 将微电网电压和频率控制在 ISO 指定的范围内，

并按照 ISO 指令调派如旋转备用和黑启动这样的辅助服务。

微电网在运行中将响应自身能量、电能质量和可靠性需求，并对可靠性服务的市场信号做出回应，但是微电网会按照电力或天然气价格的市场信号进行管理。如果微电网的发电量达到地区净发电量的 5% 左右，由于其能快速地对市场信号做出反应，微电网就可以有效地化解传统的电力市场危机。这样，微电网就可以通过优化使用燃料来使系统的整体效率最大化，使损耗和排放量最小化。

传统的配电保护方案是基于高的故障水平和从电源到负荷的单向潮流来设计的。与传统方案不同的是，微电网的故障水平低得多，这归功于：①小容量微电源和它的电力电子接口；②在配电馈线上具有双向潮流。因此，传统的过电流保护并不适用于微电网，在保护模式方面需要全新的思想。

微电网通过对发电的“孤岛化”、重新调整、启动和停止，可以灵活地适应系统配置的快速变化。就此而言，决策者需要决定是否允许微电网改变其系统配置，以防止完全停电、维持对重要负荷的供电以及帮助系统恢复，或者是否允许整个配电系统沿预定线路运行下去直至崩溃。

在某些情况下，由于重新配置的成本过高，可能对现有的配电线路运行模式没有任何经济的替代方案。但为了发挥分布式能源（DER）的效益，令人满意的做法是重新设计配电馈线保护方案，以适应 DER 作为电力孤岛独立运行。此外，微电网可以出售一些备用容量给馈线上的其他用户，使包括电力公司在内的各方获益。

尽管当前的电力方案在对这项新技术的推进上仍比较保守，但配电系统发展方案的设计者正在努力实现满容量的分布式发电和微电网。电力公司可能会受到来自以下三个方向的压力，从而提出鼓励 DER 和微电网的部署。

（1）由于微电网业主和 DER 厂商更熟悉基本能源生产，他们将会扩大自己的业务范围。

（2）国家监管部门会给电力公司施压，使其接受更大规模的 DER 并网。

（3）ISO 也会意识到，在开放的市场中微电网和 DER 能够出售许多的辅助服务。

因此，为了配电系统的更大利益，国家监管部门需要采取积极措施加快新技术的实施。微电网和主动配电网管理系统将在第 4 章进行讨论。

第4章　微电网和主动配电网管理系统

4.1　简介

微电网要求宽范围控制，以保证系统安全、优化运行、减少排放，并能确保在满足系统约束和监管要求的情况下，实现从一种运行模式向另一种的无缝切换。这种控制通过中央控制器（Central Controller，CC）和连接到微电源及储能设备的专用微电源控制器（Microsource Controller ，MC）来实现。

中央控制器和微电源控制器的功能及两者之间如何协调，在本书第1章第1.5节中作了详细说明。顾名思义，微电源控制器负责微电源局部的控制功能；中央控制器则全面控制微电网的运行，并通过微电源控制器进行保护。中央控制器主要功能是通过功率-频率（P-f）控制、电压（Q-V）调节和保护协调来保证电能质量和可靠性。中央控制器也执行微电源的经济性发电计划，并在双方合同约定点帮助维持来自主电网的电力输入。因此，中央控制器不仅要协调整个微电网的保护计划，还要为微电源控制器安排电力调度及设置电压整定点，以满足用户的需要。所以，中央控制器要确保微电网能够将能源利用最优化，要维持电力负荷规定的频率和电压波形。中央控制器被设计成自动模式下运行，也可以按需求手动干预。它通过两大主要模块连续监控微电源控制器的运行，即能量管理模块（Energy Management Module，EMM）和保护协调模块（Protection Co-ordination Module，PCM）。EMM和PCM的功能在本书第1章第1.5节中进行了说明。本章将讨论微电网和主动配电网的网络管理，而保护问题则在第5章详述。

4.2　微电网的网络管理需求

微电网的网络管理主要由保护协调模块（PCM）支持的能源管理模块（EMM）和各个微电源控制器来实现。EMM实现微电源的发电控制、家庭过程控制［如暖通空调（HVAC）］、水加热和制冷的最优化、能源存储控制、维持电能质量和工业过程，并提供当地的辅助服务。微电网对电力公司的最大好处是，可以移峰并提供若干辅助服务。然而在初始阶段，EMM只能实现一些基本的控制。当配备了智能电子装置（IED）和以太网通信协议，就可以选择完成更精细和更复杂的控制。

以EMM进行的网络管理需要注意一些事项，这些事项将在4.2.1～4.2.5节中讨论。

4.2.1 微电源发电控制

微电源采用不同的可再生和低碳技术发电。只要有可用的燃料，可再生微电源将以最低的燃料成本发出最多的电。使用天然气、氢气等的微电源，则应在其运行的经济效益最佳时方投入运行。热电联产（CHP）的微电源在发电的同时也产生了热能，因此也必须平衡热负荷。故选择微电源的运行周期和运行功率水平是相当复杂的，需要考虑燃料成本、发电和供热延迟所产生的成本，以及排放和延迟排放（Deferred Emissions）的影响。微电源发电控制的最重要目标是确保最大可能的能量节约。

由于对热负荷和电负荷的需求不是在所有时间都能协调，因此热电联产微电源的发电控制需要排定热能或电能的优先次序。有时，微电源提供如电压调节、旋转备用、移峰和穿越电网电压暂降的控制之类辅助服务，这些服务带来可观的经济效益，足于超过用户发电产生的收益。然而，市场结构在评估和处理竞争需求时起着很大的作用，能鼓励投标者参与竞争。因此，微电源业主不仅为了自己的需求，也为了开拓市场，会控制发电。

4.2.2 家庭过程控制

家庭过程控制系统监控着建筑物的供暖和空调设备，即中央供暖系统、冰箱、风扇、阻尼器和泵，这些设备都可以由微电网的热电联产微电源来供热、供电。一幢建筑的热负荷包括热水供应系统、干燥系统、空间加热器等。对这些设备，微电源必须优化热的生产，同时考虑其他需求，例如提供辅助服务、减排及原料成本。需要优化暖通空调（HVAC）系统的几个变量，以确保最大的能源效率，这些整定值取决于气象参数、原料成本、建筑物结构及入住率。也要对热和电的生产一并优化，可在不妨碍冷却器、锅炉、热泵、热交换器、气阀、鼓风机等的专用控制器正常运行的情况下，使用能源管理模块（EMM）进行优化。

在能获得低价天然气的期间，采用传统锅炉来生产热较为经济；而在电价高的峰值负荷时段，热电联产设备以最大容量运行则更为经济。因此 EMM 应到电力和天然气市场收集实时数据作燃料价格对比；也要收集短期天气预报数据，据此为所有的热能生产商（包括 CHP 微电源）安排运行计划，以实现流程最优和系统的可靠性。EMM 为实现正确的操作顺序，需要监控当前的系统状况，然后向所有设备发出适当的指令。

理想情况下，微电网的 EMM 应借助微电源控制器满足以下控制需求：

1）决定由源头回收热能的正确计划及相应的控制。

2）将废气和水输送到热交换器，恰当使用废热。

3）监测热交换器废气入口的温度，以便如果温度过低或过高均可以将回收系统旁路。可调整的设定值可用于达到此目的。

4）监测热交换器出口的水温以防止过热，并为水流控制提供变量信号。

4.2.3 能量存储

为保证对优先负荷的不间断供应，EMM 要控制储能设备如电池、飞轮、超级电容器等的运行。事实上，微电网的成功运行主要取决于发生突发事件和扰动时能对储能设备进行恰当的操作及控制。然而，这些设备仅用于补偿当地母线电压暂降，或用作停电时的备用电源，但不能补偿小时级能源价格，也不能拉平峰荷。由于某些微电源具有小的惯性或者穿越能力，在配电系统低电压暂态区间、电动机起动或者其他短时过负荷，特别是独立运行时，这些储能设备有助于起到补充作用。

由于大部分的储能设备产生的是直流电，因此需要连接到微电源的逆变器，实现 DC/AC 变换。相反，由于飞轮发电机直接产生交流电，因而可以直接馈入微电网母线。由于储能设备必须反应迅速，故要使用自身专用的局部控制器，而非由 EMM 控制。某些储能设备，如电容器，可以高功率密度储电，但须短时间放电。但是有些储能设备，例如飞轮发电机要低功率密度储电，但其放电时间可以长一些。因此，这些设备可以搭配往复式发动机，以延长供能时间。

4.2.4 调整及移峰填谷

与传统电力公司不同，微电网中由于负荷使用性质，负荷曲线含有短期峰值，这是因为诸如热水器、烤箱、热泵这样的家用负荷经常同时运行。商业用户的峰值更为明显，如餐馆和酒店同时使用的负荷更多。然而，如果把由同一个微电网供电的数个上述用户在不同时间达到的峰值合计起来，由于峰值被平均，负荷曲线就被拉平。在更大的负荷群如能源园区或大学校园、办公楼群或住宅区，负荷曲线就更加平滑。一般情况下，微电网的负荷群越小，负荷曲线的峰值越大。因此，微电网就需要有更多的备用储能，特别是以独立系统自治运行时尤为如此。在此情况下，储能设备的充电将作为附加的负荷有效利用，以平均总负荷，使整体负荷曲线更为平缓。

能源管理模块（EMM）的一个重要功能，就是可以合理地安排负荷，以平缓电力负荷曲线，包括对储能设备的充电和转移某些负荷的峰值。对此，EMM 可以通过在特定的时间（这个启动时间可能有些随意）启动某些负荷来实现，而这些负荷能有助于拉平峰值。EMM 也可以计划在负荷高峰时段使用低价燃料对热能存储（TES）系统进行储能，以平缓负荷曲线。

调整的定义为时刻对时刻的基础上调节产出，使之与负荷需求匹配。为了实现短时间调整（例如秒对秒），微电网必须具有比长时间调整（例如分对分）所需更大的峰值发电容量。在独立运行期间，仅当没有可用的备用发电时，微电网才必须满足基于短时间调整的负荷。在此情况下，EMM 要将必要的能源存储用于保障优先级负荷，断开次要级负荷。否则，微电网会遭遇严重的电压骤降，继而导致系统崩溃。

可以看到，较大的电力公司的负荷曲线看起来要比微电网的负荷曲线更平缓

些。故此，微电源发电必须有快速电力电子控制的储能设备来进行快速的负荷跟踪。此外，EMM 要通过负荷移峰填谷来实现适当的负荷协调，至少要对更大的负荷包进行协调。而且，EMM 还要履行的功能是对较大负荷预测值的修正及评估其对系统的影响。同时，EMM 还需要全面关注优化微电网运行的现有市场支配力。

4.2.5 辅助服务

某些服务是否该由微电网提供，人们对此颇有争议。一种观点是，微电网应该作为一个需要控制其负荷需求和功率因数的受控的负荷单元。另一种观点是，在峰值负荷期间，微电网还应通过电力市场向主电网销售电能。总而言之，除了作为受控负荷，微电网在获得合适费用的前提下可以向主电网提供多种辅助服务，并最终服务于终端用户，对此在 3.6.1 节中进行了讨论。

就技术而言，电力公司将微电网视为可控负荷更为方便，因为微电网系设计用来向使用双向潮流的负荷供电。然而，微电网的重要性在于，它可以向主电网提供有价值的辅助服务，以维持电能质量，尤其是在系统承受压力之时。例如，微电网的负荷控制能力可以实现对用户的电压波形的完好控制，其对功率因数的控制，实际上也能控制电压。因此，如果电力是微电网提供的，那么就能避免在用户端采用电容器控制无功功率。大部分的辅助服务都是用于微电源和负荷间的实时能量平衡。而黑启动辅助服务，对于微电网自身在与主电网没有任何电力交换的情况下，维持其主要负荷就具有特殊意义。

微电网在提供这些服务时面临的一个主要挑战是通信系统的速度。在放松监管的环境里，开放的竞争市场鼓励在对输电分门别类后不仅销售电能，还提供辅助服务。这无疑将促使电价降低，增加经济效益。微电网可作为电能供应商，同时又能以电力服务的客户的身份加入开放的市场，带来资源利用的全面改善。主电网的主发电机组能自由发电，无需再提供辅助服务，这将为其带来巨大的效益。

4.3 微电源控制器

微电网中的微电源和储能设备都适宜使用微电源控制器。微电源控制器以平滑和灵活的方式运行，以满足用户和电力公司的要求。微电源控制器可以运行于有或没有中央控制器的干预之下，微电源控制器的功能主要依赖于微电源和储能设备中的电力电子接口。微电源控制器确保了：①系统中增加新的微电源无需对现有的微电网结构作任何调整；②微电网能以快速、无缝的方式，将自身与电网并列或者解列；③可独立控制有功和无功功率；④电压暂降和系统不平衡都可以校正；⑤消除故障而不会影响稳定性；⑥微电网可以满足电力公司的负荷动态要求。微电原控制器设计的关键特性如下：

1）如果没有中央控制器的介入，微电源之间无互动的余地。这让每台微电源

控制器可以不需要其他任意微电源控制器或数据源的数据，就能对系统的变化做出有效响应。

2）虽然微电源控制器设计为要与中央控制器通信并执行其指令，但微电源控制器可以跳过被视为不可接受的来自中央控制器的指令。

4.3.1 微电源控制器的控制功能

微电源控制器的内在控制特性如下：

1）有功和无功功率控制。

2）电压控制。

3）快速负荷跟踪的储能要求。

4）通过功率-频率控制的负荷分担。

微电网与主电网解列时，要保证微电源能迅速对负荷供电，微电源控制器也应能实现微电网从联网模式到独立运行模式时的无缝转换；反之，由独立运行模式到联网模式时，要能够把对微电网和大电网这两个系统的扰动降到最低。

4.3.1.1 有功和无功功率控制

微电源可以是①直流电源，例如太阳能光伏、燃料电池和蓄电池，或者是②交流电源，例如微燃机、风力发电机。第一种情况下，直流电直接转化为50/60Hz的交流电。第二种情况下，交流电以非工频发出后，首先整流成直流电，继而经换流器转化成工频交流电。两种情况下直流电/交流电的转化，都需要电压源逆变器，这是电力电子变换器的基本部件。

图4-1中给出的是由微电源和电力电子变换器组成的某典型微电源控制器的基本示意图。变换装置中位于变换器终端（Bus-1）的电压源逆变器控制输出电压（$V\angle\delta_1$）的幅值（V）和相角（δ_1）。微电源通过阻抗为X的电感向微电网母线（Bus-2）提供电压为$E\angle\delta_2$的受控的电力。正常情况下，相角$V\angle\delta_1$超前$E\angle\delta_2$的角度为δ，这里$\delta=\delta_1-\delta_2$。有功潮流（P）受控于δ，而无功功率（Q）受V控制。控制基于输出功率P的反馈回路和微电网的母线电压幅值E，见如下方程式：

$$P=\frac{3VE}{2X}\sin\delta \tag{4-1}$$

$$Q=\frac{3VE}{2X}(V-E\cos\delta) \tag{4-2}$$

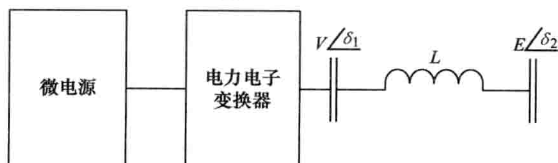


图4-1 典型微电源控制器示意图

4.3.1.2 电压控制

除了对有功和无功功率的控制外，微电网母线上的电压控制对于微电网整体的

稳定性和可靠性而言也是必需的。没有适当的电压控制，拥有很多微电源的微电网可能会出现无功功率振荡的情况。与大型同步发电机的情况相似，微电源控制器的电压控制功能旨在减缓微电源中的大无功环流问题。一般对于大电网来说，正常情况下发电机间大的阻抗会限制环流。但是在微电网中这个问题就变得明显了，因为馈电线路大部分呈辐射状且电源间的阻抗小。有时候在其电压整定点有小的差别情况下，这些环流的值甚至会超过微电源的额定电流值。采用无功-电压（V-Q）下垂控制器可以控制环流，这种控制器的下垂特性可参考图 4-2。

该控制器的作用是，当微电源的无功电流主要是感性时，提高当地电压整定值，而当此电流主要为容性时，则降低该电压整定值。无功功率极限由逆变器的伏安额定值 S（var）来整定，其与微电源的有功功率输出（P）的关系如下：

$$Q_{\max} = \sqrt{(S^2 - P^2)}$$

4.3.1.3　快速负荷跟踪的储能要求

对于并网运行的微电网，新负荷连接期间最初的电力平衡问题由电力公司惯性大的发电机负责。但是在独立运行情况下，微电网需要通过自己的储能设备来保持最初的功率平衡，这些储能设备可以有效地为微电网提供系统惯性。直流储能设备连接到微电源的直流母线，交流储能设备则直接连接到微电网母线。微电源控制器确保适当利用储能设备来进行快速负荷跟踪。

4.3.1.4　通过功率-频率控制的负荷分担

微电网控制器可确保从与主电网并列的模式到独立运行模式的自动平滑转换，反之亦然。这与不间断电源（UPS）系统的运行情况类似。在向独立运行模式转换期间，每个微电源的控制器都会运用本地的频率-功率控制改变其运行点，以实现新负荷下的本地功率平衡。这是控制器在适当的负荷跟踪后自动完成的，无需等待中央控制器或者附近微电源控制器的指令。图 4-3 示出了微电源控制器用于频率-功率控制的 P-f 下垂特性。

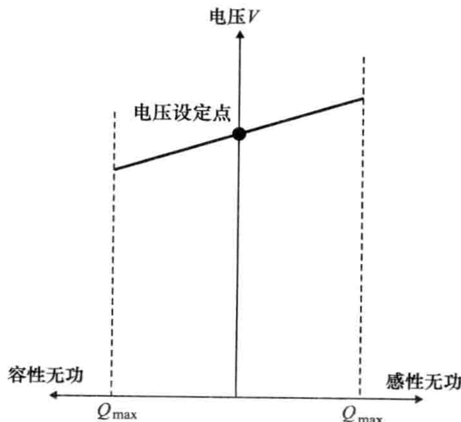


图 4-2　V-Q 下垂控制器的下垂特性

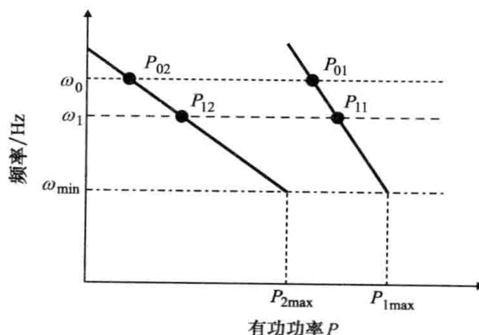


图 4-3　有功功率-频率下垂特性

联网模式下，微电网的负荷由电力公司主电网和微电源两方面供电，取决于用户的需要。电力公司的供电因意外中断时，微电网将无缝转换到独立运行模式。转换期间，微电源的电压相角也随之改变，导致其功率输出明显下降。继而，当地频率也受影响而变化。在此情况下，每个微电源都迅速地分担其负荷份额，无需来自中央控制器的任何新的电力调度计划。例如，假设 2 个微电源运行在共同的最小频率下，其最大容量为 P_{1max} 和 P_{2max}。联网模式下，它们以基本频率运行，送的电力分别为 P_{01} 和 P_{02}。随着负荷需求的变化，微电源运行在不同的频率下，这会引起功角的相对变化，而运行频率将依负荷分担比例的不同降到更低的共同值。以上所述皆依据图 4-3 所示的频率-功率下垂特性而发生。因为按该特性的调整，降低了微电网的频率，MC 需要具备一项控制功能，以恢复到负荷份额适当的额定频率情况下运行。

4.4 中央控制器

中央控制器通过两个基本模块进行控制：①能源管理模块（EMM）；②保护协调模块（PCM）。

4.4.1 能源管理模块

EMM 有多种控制功能，实现微电网的能源优化运行。这部分要讨论的是简易的 EMM，有了它的基本的优先控制功能，微电网的运行才会令人满意。可以增加控制功能的数量，以实现更佳更复杂的控制，虽然这也会让设计更复杂。

4.4.1.1 基本的微电源控制功能

EMM 简化后，只向微电源控制器提供有功功率和电压整定值，与此同时，基本的微电源控制功能只能通过微电源控制器才能发挥。有功功率的调度整定值取决于燃料成本、电功率成本的财务估算，取决于气候因素和预期的程序运行要求。电压整定值应保持在预设的范围内，以确保微电网中适当的电压调节。

1. 电压控制

通常，改变微电源的电压幅值和相角就能控制微电网的负荷及其功率因数。为避免 EMM 的控制方案过于复杂，对微电源的当地电压和功率因数的控制通过微电源控制器而不是 EMM 来实施。EMM 只向微电源控制器提供微电网中某些重要母线的电压整定值。当微电网中的配电馈线负荷不足时，馈线上的电压可能会出现升高的趋势。为了抑制电压升高，微电源控制器要不断监测当地电压并向 EMM 提供反馈。随后，EMM 向微电源控制器发出所需的电压整定点按要求进行电压调控。该控制策略的目的是要让微电网以微电源和负荷的集合出现在主电网中，作为有同一功率因数的受控单元运行。

2. 功率因数控制

与传统的同步发电机不同，微电源通常没有任何内在的功率因数控制功能。功率因数决定于负荷，所有的微电源控制器都有功率因数控制特性，起到负荷跟踪的作用。然而，有些微电源的电力电子接口可能有内在的功率因数控制，用来控制所供电流的相位角和使谐波畸变最小化。由于微电源控制器囊括了功率因数控制的所有特性，因而，除了电压整定点外，功率因数控制的实施过程再无需能源管理模块（EMM）的指令。

3. 原动机转速控制

这个特性适用于带有旋转原动力的微电源，例如微燃机和风力发电机。为了在容量范围内适应微电网的负荷变化，微电源的原动机要改变自身转速，以达到新负荷下的功率平衡。为此，定速原动机要改变燃料投入。这样会再次影响原动机的效率，因为效率取决于燃料的使用及速度。因此，要控制原动机转速，以保障微电源能够高效发电。为了保持 EMM 的设计简化，此控制仍旧由微电源控制器来执行。

4. 频率调节

传统电力系统中发电电压的频率取决于同步发电机的转速。另一方面，对微电网而言，只要微电源具有含微电源控制器的电力电子变换系统，其就能以任何频率发电。在联网模式下，微电源控制器无需通过其功率-频率下垂特性进行功率-频率控制，因为频率变化由主电网自己解决。而在独立运行模式情况下，微电源控制器要进行这项控制以适应负荷变化，维持恒定的系统频率。因此，两种运行模式下 EMM 都无需干预微电源控制器的频率控制特性。但是，EMM 要持续监测微电网的频率。如果频率降低而微电源控制器未在预定时间内调整恢复，EMM 要基于达到紧急状况下的功率平衡的要求快速切除负荷，以确保微电网的稳定。

4.4.1.2 典型微电网环境下的 EMM 运行

为了保持微电网控制简单，EMM 的控制功能被限制到最少的基本项。这可使 EMM 从微电源控制器获得反馈信号的数量最少，以实现对微电源发送重要指令。EMM 的运行策略将在下面两节里作简要论述。

1. 联网运行

联网模式下，EMM 的控制信号只限于微电源的有功功率和当地电压整定值。微电源控制器控制着当地电压和功率因数，使微电网成为主电网中运行在同一功率因数下的一个可控负荷。因此，EMM 不进行额外的电压控制。因为这会干扰主电网的电压调节器和并联电容的功能，或者干扰到微电网自身中的微电源控制器。如果微电网中的配电馈线负荷轻和电压稍有升高，就会被主电网控制器检测到。然而，EMM 只对某些关键的微电网母线发出微电源电压控制的命令。

2. 独立运行

同样，在独立运行模式下，EMM 的主要作用是为微电源控制器提供有功功率和电压整定值。微电源控制器通过 P-f 和 Q-V 下垂特性来自动控制频率和无功潮

流。对于相位角和频率控制，能源管理模块（EMM）不会对微电源控制器下发任何指令信号。但是，EMM 要持续监测微电网的频率并且在频率未在预定时间内恢复时通过微电源控制器快速切除负荷，以确保微电网的稳定。独立运行模式下，这些控制功能会迅速做出反应，以尽可能快的保持供需平衡。因为对于发电能力而言，孤岛状态下的微电网不如联网状态下稳定。

4.4.1.3 热负荷控制

由于对热电联产（CHP）的微电源来说，热负荷远优先于电负荷。因此，CHP 电源的电力输出控制策略主要取决于用户的热负荷需求。在热负荷的问题上，为了管理这种优先需求，在 EMM 对微电源控制器的热负荷调度信号中设置了一组优先权参数。然而，有些工业热电联产系统的电力输出比热能的价值更大。因此，EMM 必须针对实际的电负荷和热负荷的相对重要性来设置优先权系数。

4.4.1.4 最大效率的能源优化

当需要向大的电力库供电时，微电网间必须互联。在这种情况下，邻近的微电网 EMM 应有让整个互联系统实现基本能源最优化的控制功能。为了发挥微电源的最佳效率，EMM 要确保在轻负荷情况下使用数量最优的微电源（特别是微燃机）接近其额定容量运行，而不是将其全部按部分容量运行。此项操控最好由 EMM 执行，因为其能优先了解流程状况、气象参数、微电源发电计划及燃料信息，例如价格、可用性和消费模式。

4.4.1.5 能量存储管理

对于互联的微电网，EMM 会通过必要时切除非优先级负荷来实现负荷控制。所以，EMM 把这些负荷间接地用作微电网内长期电力后备的潜在源。储能设备只提供短期（通常为 1min 内）的用电需求，特别是在突发事件情况下，用以维持优先负荷的不间断供电。为了满足长时间的需求（大约数十分钟），可在不对微电网造成任何损害的情况下，通过切除非优先负荷来发挥电力后备作用。

4.4.1.6 智能 EMM 的可选控制功能

更复杂的智能 EMM 未来可设计为有更多的控制功能，例如过程控制和对微电源的智能控制，这取决于分布式能源（DER）的类型。智能 EMM 要有广泛的信息处理能力、智能电力电子接口、足够的通信网络来和邻近的设备通信。这种 EMM 还要有基于人工智能（Artificial Intelligence，AI）技术的控制算法，而且要监控更远的设施。有了这些功能，它们可以通过无线（RF）网络或以太网连接，经由传感器从多种控制/监测设备上收集现场数据。未来，EMM 还会有因特网和地理信息系统（GIS）兼容的功能。

EMM 要能记录数据/事件，允许被授权的运行人员获取参数或运行情况方面的必要信息。EMM 还要能转化成手动模式。用户如果有需要，可允许操作者跳过自动操控对基本操作编程，为多种流程设定值，进入自己的计算和模式。

复杂的能源管理模块（EMM）要能够管理信息、提供运行指南、为系统运行人员设定值和自动决策，以全面改善系统性能。EMM 的运行目标是，可用率最大化、保持高质量的服务和最少的停机时间。EMM 还必须监测设备老化情况和诊断流程问题。通过数据采集与监控（SCADA）系统，EMM 还能监控微电网发电和能量存储的工业过程。

另外，智能 EMM 可用于：①提供对过程控制系统的全面综览；②关注能量消费情况；③按时段、过程状况和天气情况分析能量存储机会。EMM 还可用于监测以电负荷为前提的能源使用情况，继而使用这些数据评估热力设备满负荷和部分负荷情况下的效率。从经济的观点来看，EMM 要利用电和燃料的实时市场价格信号来自动优化微电源及储能设备的使用。

4.4.2　保护协调模块

保护协调模块（PCM）监控微电网的全部保护。微电网的保护理念不同于传统的配电网络，尽管两者都是辐射状系统。这是因为存在以下差异：

1）微电网包括发电机和负荷，导致在辐射状网络的保护装置中可通过双向潮流。

2）由于微电源的存在，被动配电网络转变成一个主动配电网络。

3）当微电网从联网模式变为独立运行模式时，微电网短路容量的变化相当大。这对传统的在短路电流下动作的过电流继电器带来深远影响。

PCM 的关键特征是具有辨识微电网在这两种运行模式下的保护要求并依此应对突发事件的能力。在下一节中，就某些可能发生的情况对两种运行模式的基本保护要求进行简要的讨论，图 1-1 示出了典型的微电网结构。可根据具体用户的要求在 PCM 中加入额外的保护功能。

4.4.2.1　联网模式下的保护方案

在联网模式下，PCM 探测并应对五种可能的情况，其分别为：①正常状况；②微电网馈线故障；③主电网故障；④微电网母线故障；⑤再同步。PCM 要考虑各独立微电源的响应时间，以及公共连接点（PCC）断路器 CB4 的响应时间。

1. 正常状况

在正常状况下，微电网仍然通过 PCC 断路器 CB4 与主电网相连。断路器 CB1、CB2 和 CB3 分别将馈线 A、B 和 C 连接到微电网母线。在正常联网运行期间，所有断路器保持合闸状态。负荷由主网和微电源同时供电。

2. 微电网馈线故障

在传统的被动辐射状配电网络中，故障潮流仅是单向地从电源流向故障点，所以馈线故障只需通过断开馈线断路器来消除。故障检测只需基于电流的大小而不涉及方向。但因为微电网馈线中包含发电机，故由来自故障点两侧的所有微电源向馈

线故障处提供双向潮流。如果故障不能及时消除，所有微电源自身的控制器会将其与发生故障的馈线断开，导致大范围的发电损失。为了避免这种情况，用分段断路器将馈线 A 和 C 分段连接。该断路器有方向过电流继电器，可以检测故障区域并消除故障。如果该区域内存在微电源，该微电源自身的控制器要将其与故障区域的连接断开，但要对连接在其母线上的负荷继续供电。对于此运行状况，PCM 要对所有继电器分级整定，以便在所有微电源断开与馈线的连接前或者整个微电网断开与主电网的连接前，将故障区域隔离。这种策略将确保发电量的损失最小和微电网的稳定性。但是在馈线 A 或 C 故障时，如果所有微电源连接在发生故障的馈线同一侧，这些微电源都将被其自身的控制器切除，而该故障馈线也将由于其自身的断路器跳闸而断开与微电网母线的连接。如果故障发生在馈线 B，则可以简单地断开断路器 CB2，因为馈线 B 上没有任何微电源。

3. 主电网故障

对于主电网的任何故障，微电网将断开连接主电网的断路器 CB4。这种情况下的保护策略很简单，CB4 的继电器监测每相电流的大小和方向，如果电流超过预置时间内的限值，则向 CB4 发出跳闸信号。保护协调模块（PCM）给出对继电器的整定，以确保在不影响对优先级负荷供电的情况下将故障完全隔离。该方案还确保微电源不在微电网与主电网解列前误跳闸，否则，这可能会导致不必要的发电损失和断路器使用寿命的减少。

4. 微电网母线故障

如果故障发生在微电网母线上，CB4 跳闸将微电网与主电网的连接断开，同时 CB1 和 CB3 分别分闸将馈线 A 和 C 与母线的连接断开。微电网内发生任何故障情况下，PCM 将 CB4 的继电器分级，使之与主电网中的“上游”保护相协调。CB4 继电器还相对微电源的保护装置分级，以最小化发电损失，减少供电中断和误跳闸。

5. 再同步

主电网的正常服务恢复后，PCM 的职责是通过同步检测方案使微电网与主电网再同步并与其重新并列。一旦电网稳定此功能就要实现，并在之前断开的负荷恢复后回到正常的运行状态。但是这可能需要几秒到几分钟，取决于馈线和负荷的性质。PCM 所含的控制方案，可以实现通过测量断路器 CB4 两侧相电压的幅值、相位、频率及相序使所有微电源与主电网同步。PCM 按需要还提供了自动和手动重新同步的选项。

4.4.2.2 独立运行模式的保护方案

运行在独立模式时，微电网母线上的短路电流水平显著降低。这是因为带有电力电子变换系统的微电源对一个故障只能给出 200% 的负荷电流。因此，一个独立模式下的微电网提供的故障电流比与联网运行模式下提供的要低得多。低的故障电流不足以被用于传统过电流保护系统的标准过电流继电器检测出，因此，这可能对

基于故障电流感测的微电网继电保护故障检测能力造成重大影响。标准的继电器可能需要长的时间来识别较低的故障电流或者完全不会反应。因此，对于独立运行的微电网保护可以采用替代方案，例如阻抗保护、差动电流/电压继电器、零序电流/电压继电器、方向过电流/接地故障保护等。下面将根据可能的状况对 PCM 的基本工作原理进行简述：

1. 正常运行

在正常运行情况下微电网自主运行。PCC 断路器 CB4 是断开的。馈线 A、B 和 C 保持连接到微电网母线而其负荷均由微电源供电。

2. 微电网馈线故障

独立运行微电网的馈线保护与微电网联网时的情况相似。唯一的区别是继电器对较低的故障电流的检测应该更敏感。保护的主要目标是最小化发电和供电中断时的损失。

PCM 的设计和运行必须考虑到微电网方案的复杂性、微电源的数量、发电技术的类型、优先负荷的数量和保护装置的响应特性。

4.4.3　中央控制器运行所需的信息

微电网的运行依赖于一系列的信息，即税费和监管规则、微电源的性能和诊断、天气和负荷的预测以及服务的差异性。有些数据易于得到，花费不大，而有些数据的获取则需花费高昂的费用。为了优化数据采集成本，在微电网的控制中，必须根据数据的重要性，对信息进行分级。还应考虑数据采集与处理的可行性、获取方式和成本，以及通过评估技术获取替代数据的可能性。有些数据对于中央控制器功能的实现十分重要，它们的有效性和经济效益将在 4.4.3.1 ~ 4.4.3.5 节中进行讨论。

4.4.3.1　税费、价格和监管信息

为最大限度地减少微电网运行的总能源成本，必须对电力公司和微电源的电能价格进行比较。进行数据比较将有助于通过中央控制器设计和实现一套合适的能源优化策略。来自电力公司、天然气、丙烷、燃料油和生物燃料的电能成本信息是中央控制器运行所必需的。从电力公司购电要遵从不同的费率结构；如传统的静态费率可能会按①电能的使用时间或者②所消耗的电量进行收费。动态费率则根据实时电价或者由独立系统运行商（ISO）运行的日前市场或者能量平衡市场所产生的费用进行收费、紧急需求响应激励或其他降低系统负荷需求刚性的方案来从经济上获益。由于在需求收费周期（一至三个月不等）结束前，某些能源增量成本不可用，这就使得微电源的经济调度策略更为复杂，可中断（负荷）的费率也会导致供应的不确定性。因此，有必要用复杂的控制算法进行市场价格的预测。在这种情况下，中央控制器的运行应仅限于现行排放量和系统效率的监管约束。

4.4.3.2 微电源的性能和监测

一个微电源在某个特定范围内运行并且在每个运行水平上有特定的性能指标。性能还取决于一些外部因素，如气象参数、微电源的使用年限、折旧程度和维护计划。微电源的动态特性对微电网的运行和控制非常重要，因为负荷变化需要调节。为实现需求响应激励，微电源将承受较大的暂态启动电流，这将再次产生额外的设备维修和降额运行的成本。可以从制造商处获取足够的数据信息，但现场性能监测和评估也可以用于优化所获的可用信息。装有柴油发电机组的微电网面临缘于现场燃料存储和排放限制的运行约束。在电力公司出现停电时，这些微电源可以被用作备用电源。

4.4.3.3 天气预报

气候条件和季节变化对可再生微电源设备的性能和能量需求（例如家用采暖的需求在冬天比夏天更大）的影响十分显著。另一方面，微电源的排放量对当地的环境与气候变化也有相当大的影响。因此，微电网控制系统应连续监测天气情况，从历史的气象特性曲线或当地的气象站收集数据。长期的气象模型可以很容易地从统计数据中得到，但短期的数据必须从当地的气象站或区域气象服务站的网站上收集。

4.4.3.4 负荷预测

能源管理模块（EMM）必须了解负荷类型、使用模式和要求，以控制微电源发电。EMM 也应该知道地区的历史负荷模式，以此确定微电网控制策略。电力负荷必须满足瞬时能量平衡，而热负荷则有一些灵活性。和电力负荷不同，由于大规模的供热或供冷存在相当大的能量滞后性，以致即使供热或供冷停止后温度也是逐渐变化的，因此热负荷不需要在任何时刻都保持准确的能量平衡。热负荷运行的灵活性可以通过使用额外的热存储进一步增强。EMM 应使用适当的热负荷模型和内部热约束条件，来确定热负荷灵活性的程度和热负荷调度允许的时间间隔。

4.4.3.5 差异化服务

对于具有不同优先级因子的差异化（多样化）负荷结构，微电网中央控制器的设计和运行需要确保所提供服务的可靠性。为此目的，负荷应根据其优先级参数进行分类，而优先级参数则取决于负荷需求的性质。微电网的负荷需求可分为：①关键性需求；②可削减需求（Curtailable Demand）；③可重新安排的需求。这些将在下面的各节中讨论。根据这种分类法，EMM 将能够用一种更好的方法控制供应和需求。

对于简单和经济的需求管理，微电网需要提供在较高费率时的峰值负荷以及考虑到分时电价（TOU）和实时峰值电价的负荷需求变化等。应提供紧急负荷响应激励，以应对获得市场认可的紧急负荷。

微电网也可以不依赖于电力公司的定价，最小化非尖峰负荷的能量供应成本，这将有助于其与当前电力市场中的电力公司的竞争。较平缓的负荷可以从整体上减

少负荷在峰值时的需求，因此也减少了微电源本地的发电容量。此外，因为热电联产（CHP）制冷可以重新计划在必要时发电，从而有效减少在费用昂贵的高峰时段的负荷，所以此类负荷是节省费用的重要一环。在协同发电情况下，通过重新安排生产过程，使微电源发电的同时又产生废热，从而实现能量的有效利用和平衡。

1. 关键性负荷需求

不论在任何价格和系统运行状态的情况下，均不能中断必须供应的负荷需求被分类为关键性需求。如果需要，无论任何价格下甚至可以切除非优先负荷都必须保证对关键性或优先级负荷的供应。为保证对优先级用户的供应，可以在其处所安装不间断电源（UPS）系统。如果能源管理模块（EMM）没有提供给这些负荷任何的控制机制，微电网会将其所有负荷考虑为最高优先级。关键性需求通常包括用于精细的计算机化工业流程和医院的电能质量（PQ）敏感负荷。

2. 可削减负荷需求

非关键性负荷需求可以削减而对用户利益不造成影响。这些负荷有足够的灵活性，可以根据需要减少以有效降低高额的费用。例如，对空调负荷可将室内温度设置高一点以减少用户的电费支付，当然这是以牺牲用户一定的舒适度为代价。将依据最大的负荷需求、范围、持续时间和削减负荷的成本，开始负荷削减前允许的时间间隔，负荷削减额定率的刚性（Stiffness of Load Curtailment Rate）和允许的负荷削减最大频次，对负荷削减的程度进行评估。然而，准确的财务效益评估将增加 EMM 设计的复杂性。但是，对于微电网的能量管理来说，通过在高电价时段或微电源停运期间的负荷削减将显著降低成本。

3. 可重新安排的负荷需求

允许再计划的负荷需求被视为可重新安排的需求。重新安排负荷计划有助于通过将几个中等功率峰值替换成一个单一的大功率峰值来平缓需求曲线。这是通过转移能量密集型活动避开高峰时段来实现的。

通过负荷的重新安排，微电网可以减轻微电源的过载和避免过高的需求负担。当 EMM 用于计划未来负荷而非实时负荷的情况下，负荷必须及时重新调整。例如，一个装设空调的建筑可在非用电高峰时期将空调设定为预冷状态而不是非要等到用电高峰期实际冷却需求开始才使用空调制冷。将根据负荷需求、可接受的最大重新安排时间间隔、重新安排的成本、开始重新安排前允许的时间长度、重新安排期间负荷在此值上下降的额定值等，来规定任何负荷重新安排的程度。然而，这样的控制需求会导致 EMM 的设计和运行过于复杂。为避免出现这种情况，应在负荷处装设智能控制器用于负荷削减和重新安排，并且必须将其状态与 EMM 保持通信联络。

4.4.4 中央控制器的控制策略设计

中央控制器的设计和运行需要一个控制策略以满足微电网的管理要求。中央控

制器控制策略的选择取决于策略执行的效率及其实施成本。一些适宜的控制策略为实时优化、专家系统控制和分散控制，下面将对其进行简要介绍。

4.4.4.1 实时优化

实时优化是 EMM 设计的最合适的控制策略。带约束条件的最优化问题广泛应用于各种领域的运行研究。在一个最优化问题中，即将被最优化的系统以数学方式表达为目标函数，依据某些约束条件必须实现最大化或最小化。标准的算法可用于解决最优化的问题，这些算法利用智能搜索技术，以获得最优解，无须对目标函数每一个可能的状态都进行评估。搜索技术利用其系统结构的知识只考虑一小部分可容许的状态，来确定系统的最优状态。

最优化问题可以转化为线性规划（Linear Programming，LP）或非线性规划（Non-linear Programming，NLP）问题。线性规划问题求解起来最快并且有确定解。一个线性编程问题的目标函数和约束条件都是线性方程，因此降低了系统的计算负担。然而，带整数约束的问题较难处理，不能保证得到一个精确解。整数约束涉及要做出是/否的决定，以及机器和/或人的数量，这些全部都是整数。非线性规划问题更加复杂，会增加控制器的复杂性。NPL 算法用于带线性约束条件的二次方目标函数的系统、可分系统和凸系统（Convex System）。

为优化策略，能源管理模块（EMM）应该收集微电网的有关信息，如运行状态参数（电压/电流/功率水平）、负荷需求、电能和热能的生产量、断路器的分/合状态、馈线负荷、气象参数、费率和设备运行状态/条件（正常运行/停机维护/备用待命）。EMM 必须一开始就考虑过去和现在的全部变量，对负荷、气候、费率和设备的随机描述，以测试未来微电网的运行状态。之后，它将发出一个决策指令到微电网设备。为简化控制算法，有些信息可以用一个常量来近似，只要这种近似与实际情况的偏差不要太大即可。

将微电网的数学描述作为实时最优化问题来处理是一件复杂的事，其原因主要是在于其中部分负荷设备性能的非线性和费率结构（如需求收费）、微电源运行/停运的整数决策、未来负荷曲线的不确定性、重新调整选项、设备的启动时间和成本，以及设备的爬坡率（Ramp-rate）。因此，根据解决方案所要求的精度、控制器的计算能力和时间约束，EMM 应该用近似法降低模型的复杂性。其也可以使用自己的优化算法或商业软件来选择最优的调度状态和调度细节。

4.4.4.2 专家系统控制

中央控制器的实时优化造成计算负担过重及产生长的求解时间，其由系统的复杂性和非线性决定。在实时环境中实施的成本也很高。为了缓解上述情况，可将人工智能（AI）技术如模糊逻辑用于中央控制器的设计。AI 系统模拟人类的推理并用一系列“如果-则（if-Then）”的进行决策的陈述来对控制算法编程。专家控制器通过一组有限的控制选项简单地根据一些规则基准进行决策。模糊逻辑系统是传统专家系统的变种，它考虑到了状态类别的“重叠”情况，并评估系统属于特定

类别的“程度”。在此，几个“if”条件会同时满足但程度不同，而最终的控制决策则由各个“Then”语句的隶属度函数决定。模糊控制器允许其规则基准比传统的专家系统控制器更复杂。

就微电网的应用而言，基于模糊 EMM 的功能为：①评估微电网的状态；②确定当前状态归入何种预先定义的类别；③遵循和执行与类别关联的调度规则。为进行优化，状态应事先归类并在 EMM 执行前为其拟定规则。之后，自适应控制策略可用来重新定义规则以适应系统管理的要求。

模糊控制系统的主要优点是它与人类的推理系统相似。因此，即使在开始时不可能对状态进行分类并为其拟定规则，在进行优化调度决策时也能基于操作人员所遵循的逻辑来开发控制器。

4.4.4.3 分散和分级控制

分散和分级控制策略可以用于：①聚集各单独微电网的超额容量向主电网竞标；②聚集各单独微电源对微电网中用户的容量竞标。在这种控制中，决策遵循层次结构，由一个代理商收集来自多家代理商的需求和供应的投标信息，并根据预先设定的规则为各个机构做出调度决策分析，这些规则可以由更高级别的控制器确定。在微电网中，各个用户和供应者将作为代理商运作，并向独立系统运营商（ISO）提交报告。ISO 将根据这些报告和政府部门的规定来确定调度策略。

4.5 结论

有一些关键的问题还需要深入研究，以改进对微电网管理系统的设计，使其实现真正意义上的智能化。重大问题如市场改革、对配电系统的影响、减少排放、通信基础设施的需求、辅助服务和保护的协调已在第 3 章中作了详细讨论。本章详细介绍了如何以及在何种程度上用微电网控制器来处理这些问题。第 5 章将详细讨论微电网的保护系统。

第5章 微电网的保护

5.1 简介

微电网是电/热能负荷和小容量现地微电源的集合，以配电电压作为一个可控单元运行。从概念上讲，微电网不能被看做传统意义上的配电网中加入了本地电源。在微电网中，微电源有足够的容量满足当地所有负荷的需求，微电网可以采用与电网同步（联网模式）和自主电力孤岛（独立模式）两种模式运行。其运行原则是，正常情况下微电网采用联网模式运行，当主电网发生任何扰动时，其将无缝地断开与主电网在公共连接点（PCC）处的连接并继续作为电力孤岛运行。图5-1示出了典型的微电网网络保护系统。

图5-1 典型微电网的保护

本章评述了为确保微电网在发生意外事故期间稳定运行必须解决的两个主要的保护问题，分别是：

（1）确定在特定的意外事故情况下微电网什么时刻成为电力孤岛。

（2）对独立运行模式下的微电网划分区段并提供充分的故障协调保护。

虽然微电网大部分的保护设备的特征和性能与目前配电网中的保护设备相同，但却因微电源中具有电力电子换流器系统而另有不同。原因如下：

（1）换流器的特性可能与现有的传统保护设备不同。

（2）不同设计方案的换流器会有不同的常数，因此没有任何统一的特性可以将换流器表征为一类设备。

（3）在系统中，由于换流器的设计和用途不同，其基本特性会发生显著的变化。

换流器带来的另一个问题是故障电流容量极低，其值通常低于额定电流的50%，除非将换流器专门设计为能提供较大的故障电流。这使得微电源的故障电流较之电力公司发电机的故障电流要小得多。如果大量的微电源具有电力电子换流器的接口，那么从联网运行过渡到独立运行时微电网中的故障电流水平会显著降低，这会影响到系统中过电流继电保护装置的灵敏度以及动作。如果继电器动作整定值按微电网联网运行方式设定为较高的故障电流值，那么在微电网独立运行时，由于故障电流很小，继电器的动作会非常慢甚至不会动作。

如果不能对微电网孤岛运行之前、期间和之后的动态特性变化有透彻的认识，微电网的保护问题是不能很好地解决的。对微电网孤岛运行的时间也要做一个现实的评估，即分析微电网通过快速隔离能获得什么好处。虽然设备标准 SEMI F47 建议当主电网中发生任何故障时，低于50ms 的快速隔离能使制造厂家获益，但这样的时间目前的保护装置尚无法达到。如果要求非常快速的隔离同时又要避免误跳闸，应将远方跳闸装置安装在主电网变电站和 PCC 断路器之间。在主电网和微电网之间安装高速通信通道也有助于微电网在非故障状况期间快速进入孤岛模式运行。

对于独立模式下的微电网安全可靠运行，保护系统应确保做到以下几点：

（1）独立运行的微电网要有合理的接地方式。

（2）微电网中故障检测设备的运行必须服从于联网运行时的故障检测系统。

（3）故障检测的一种方法是不依赖于故障电流和最大负荷电流之间的大比值，而是必须能够对进入孤岛模式后降低的故障电流水平作出响应。

（4）如果有必要，任何现有的反孤岛方案都应检查和修改，以防止微电网运行不稳定或者因敏感的整定值引起不希望的微电源损失。

（5）在微电网区域内，所制定的任何减载方案都必须密切协调配合。

本章探讨了对近一个世纪的经验累积形成的电力系统保护方案进行革命性的改变之前，现有保护装置和方案下保护的问题能解决到何种程度。

5.2 孤岛运行：与主电网隔离

微电网的容量通常不会超过 10MV · A，相对于主电网来说非常小。微电网中必须有足够的发电容量以满足绝大部分负荷的需求。如果不是在公共连接点断开，

微电网有部分仍与主电网连接。对这种情况，IEEE 标准提出了一个微电网联网运行时必须满足的最低互联保护准则。实施的成本和技术限制对微电网的保护设计方案非常重要。对于微电网的孤岛运行，下列问题应充分考虑：

(1) 保护系统动作的速度是否满足 SEMI F47 规范的要求。

(2) 如何尽量减少误隔离（Spurious Separation）?

(3) 当发生欠电压、断相或电压不平衡时，是否允许非故障隔离?

(4) 有电力输出的微电网增加了保护隔离限制。

(5) 微电网是否能够自动或手动与主电网再同步，尤其考虑频率和电压的匹配。

5.2.1 不同的孤岛情况

本节将讨论以下几种微电网的孤岛情况：

(1) 与故障馈线快速隔离。

(2) 防止误隔离。

(3) 非故障隔离。

(4) 有电力输出的微电网的隔离。

(5) 与主电网的再同步。

5.2.1.1 与故障馈线快速隔离

微电网的一个主要任务是在任何供电中断期间能够不间断地向重要负荷供电。如果微电网中的负荷为电压敏感型，故障切除时间不得超过 50ms（根据 SEMI F47 的规定），但是就目前的保护装置而言，在任何情况下其切除速度都达不到。通常，保护继电器检测到欠电压或者过电压需要两个周期的时间，而在接收到跳闸信号后，中压断路器（MV）则需要 3~5 个周期的时间来断开线路。因此，如果在公共连接点处没有响应速度足够快的固态断路器，就必须采取其他手段以防止电压降到 50% 以下的时间超过 3 个周期或者更长。为了实现设计和改进保护方案，要考虑下面两种情况：

(1) 何种情况下无需隔离。

(2) 何种情况下需强制隔离。

1. 何种情况下无需隔离

这种情况发生在故障位置不在公共连接点（PCC）和主电网变电站断路器之间。例如，故障引起的变电站母线电压暂降可能会出现在相同变电站的相邻馈线上。在此情况下，一种可选择的防止电压暂降的方法是安装电子电压暂降校正器，或者可以将 PCC 处的变压器的 Y-Y 联结方式变为 Y-△ 联结，并且增设一台高压侧断路器。对于主电网中的单相接地故障，Y-△ 联结的变压器可以保证微电网的相对地电压不会降到 58% 以下。上述两种方法表明，在发展经济性微电网时必须同时考虑保护注意事项和设计方案。

安装电子电压暂降保护器的费用比较高。目前可用的有两类，一类适宜较短的保护时间，另一类适宜较长的保护时间。时间较短的电压暂降保护器未用任何储能装置，典型的只对两个周波有效。另一方面，时间较长的电压暂降保护器则配备了储能装置。然而，如果欠电压状态没有持续太久或者不低于 50%，计划配置的暂降保护器则不需要大容量的存储。甚至在零电压状态下，大多数暂降保护器也能使电压维持三个周波。因此，如果将瞬动继电器和三周波断路器安装在微电网主进线相邻的所有馈线上，相邻馈线发生故障时，电子电压暂降校正器与快速继电器的组合可满足 SEMI F47 标准对快速消除故障的要求。对于微电网内发生的故障，解决方案很大程度上将依照主电网的现行惯例，例如使用快速熔断器保护。电子电压暂降校正器同样也需要满足 SEMI F47 标准的要求。然而，如果主电网使用馈线的瞬时过电流跳闸来达到节省熔断器的目的，那么微电网的隔离就是必需的。

将联络变压器的联结方式由 Y-Y 联结变为 Y-△ 联结是较为经济的解决方案，虽然这种方法的效果并非很有效。根据 SEMI F47 标准的要求，电压暂降低于 70% 时只允许持续 0.2s，所以主电网的保护响应必须具备足够快的速度，以保证有足够的时间消除具体的故障。另外，Y-△ 联结方式只对△侧单相接地故障以及 Y 侧线路和中性线之间有负荷连接时有效。

2. 何种情况下需强制隔离

当故障发生在公共连接点（PCC）处的主进线馈线上时，微电网就必须与主电网隔离。如图 5-1 所示，故障点在公共连接点断路器 CB4 的“上游”。故障要在满足所有技术指标（例如 SEMI F47 标准）和主电网保护要求的前提下快速隔离，即使与主电网的连接未维持低的欠电压状态。因此，需要作出大量努力来开发即使没有长时间的电子暂降保护器也能满足 SEMI F47 标准的快速保护装置。如果快速跳闸装置安装在微电网中，对电子暂降保护器的储能要求就会相应地降低。

5.2.1.2 误隔离

从运行的角度来看，维持微电网和主电网之间的联系很有必要。但是如果在连接处发生故障，那么根据 SEMI F47 标准的要求，微电网必须通过快速跳闸与主电网隔离。投入成本低廉的保护装置是不够安全的，可能会发生误动跳闸或者误隔离。虽然技术标准对在 PCC 处测量电压和频率的保护跳闸整定值进行了强制性地规定，但这不能对故障位置准确定位（例如，故障是发生在微电网的主进线馈线上，还是微电网本身发生了故障）。目前，能使 PCC 处断路器快速跳闸唯一可靠的方法是要有来自主电网变电站断路器的远方跳闸信号。

引起误跳闸的问题不仅来自于机电继电器和断路器，而且还来自于只对 PCC 信号响应的基于微处理器的复杂保护部件。尽管主电网和微电网的容量有着很大不同，但是这些部件也不能做到每次都能确定故障的位置。微电网误跳闸产生的影响不同于那些单一微电源联网的情况。对于微电源，一次误跳闸的损失仅限于短暂的千瓦时电能销售额，以及再启动、重新同步所产生的成本。反之，对于微电网，一

次误跳闸意味着发生重大的电能质量问题。因此必须核算和调整互联保护的成本，以预防给生产制造带来潜在损失而不仅是千瓦时电量的损失。

如果微电网作为自身负荷的后备电源，那么误隔离带来的影响在一定程度上是可以承受的。通过使微电网从故障主电网快速分离出来，以保护其免受上游扰动的影响，并能继续稳定运行。只要隔离后微电网能够恢复稳定运行，那么误隔离对微电网的运行以及主电网的影响就会很小。能够承受错误跳闸的主要好处是用于分离的继电器整定值可以只用电压、频率偏差或者持续时间来确定，即使这些整定值不能对大电网故障的位置准确地定位。如果不可接受的电压偏差的持续时间超出了可接受的范围，则需要进行隔离操作，即使这会造成主电网馈线的停运。因此，较之通过测量公共连接点（PCC）处的电压和电流来确定故障位置的方法，继电保护的问题变得更加简单了。

然而，微电网设计者可能会提出下面几点来反驳这种过于简单的保护方法：

（1）如果微电网孤岛运行时切除一些非重要负荷，那么允许误隔离就可能会造成这些负荷的无故停电。

（2）对于输出电力的微电网，误隔离会导致收入损失和微电网频率稳定过程中一段时间的过频率运行。另外，主电网也会认为如此频繁的发电中断是不值得的。

5.2.1.3 非故障（Non-fault）状态下的隔离

在非故障状态下也可能会出现低电压现象。因此，如果微电网与主电网的控制器之间没有高速的通信，那么低电压状态是否与 PCC 和主电网变电站之间出现故障有关很难查明。对于不是由要求 PCC 处跳闸的故障引起的欠电压，虽然主电网在试图消除低电压，一般还是希望微电网能够并网运行。微电网和主电网之间也可商定一个与电压限值配合的跳闸控制，以保证电压平衡状态符合 SEMI F47 标准的要求。当希望的跳闸电压水平低于 IEEE P1547 标准规定的延时跳闸整定值时，跳闸控制可以通过与①主电网或者②PCC 处使用单相欠电压继电器平衡电压闭锁的跳闸限制系统来实现。然而，目前 P1547 标准考虑的跳闸水平只是针对“非计划性孤岛运行”，而没有“计划性孤岛运行”。虽然这样的跳闸限制可用现有的设备来设计，但欠电压跳闸的整定值最终仍取决于微电网的运行约束，即负荷的电压敏感度和微电网从跳闸后的低压状态恢复正常的能力。

在配电馈线上总会出现某种程度的电压不平衡，电压甚至会低于正常水平。微电网能够容忍的欠电压极限（即在该电压整定值下微电网会自动解列变为孤岛运行）取决于像变压器接线和微电网接地点位置等因素。应该考虑负荷、微电源和其他配电设备对电压不平衡的敏感度，来确定建立微电网容许的欠电压极限标准。然而，很难确定电压不平衡是由于微电网自身还是其外部原因引起的。微电网自身负荷用电量在其总发电量中所占的比重将使这一问题变得更加复杂。因此，在公共连接点处应将智能控制功能纳入保护协调模块（PCM）中，以根据电压不平衡状

态做出适当的决策，即微电网是否应隔离。

断相通常与其熔断器位于变电站变压器和公共连接点之间的系统有关。没有任何故障时也有可能发生断相，只是这种情况比较罕见。非故障引起的断相是很难探测的。复杂性取决于断相与公共连接点之间（通常含有三相开关装置）的变压器的数量及其类型。由于断相会导致线电压维持在 50% 或以上，微电网可能无法将断相作为异常状态检测出来。然而，断相状态被认为对变压器和微电源有潜在的危险，如果没有三相断路器将断相很好地隔离，便可能产生严重的过电流或者过电压，这可能会对主电网线路上工人的安全构成威胁。为此，对于微电网在公共连接点与变电站断路器之间连接熔断器的方法应坚决禁止，或者即使连接了熔断器也必须要采取保护措施以防止发生断相故障。

5.2.1.4　电力输出型微电网的隔离

电力输出型微电网不能通过在一个位置使用简单的反向功率继电器来确定电网的意外情况。同时，因电力输出型微电网本身有足够的发电容量，主电网故障时简单的欠电压/过电压继电保护方案是不能保证跳闸响应的。作为电力输出型微电网，其发电容量较之最大负荷是过剩的，其阻抗比与主电网的非常接近，这一点是电力输出型微电网与电力输入型（或者非电力输出型）微电网最大的不同。因此，在发生故障期间电力输出型微电网的分压情况较之联网运行的电力输入型微电网是明显不同的。较之连接于二级或当地网络的电力输入型微电网的传统保护配置，要成为一个电力输出型微电网，必须对保护和控制系统的主要部分重新设计。电网保护系统和设备的制造商正在潜心研究生产适合于电力输出型微电网的保护和控制装备。

5.2.1.5　再同步

保护和控制方案一般用于常规同步发电机的手动或者自动再同步，以及电力电子变流器接口微电源的自动再同步。如果微电网只有单个的微电源，那么选择手动还是自动实现再同步很大程度上取决于操作者的技术和操作能力。但是，如果在不同的位置有多个微电源，那么在保护协调模块（PCM）的设计中就应考虑自动再同步方案。PCM 可能还会包含其他精细的控制，例如在暴风雨条件下延迟再同步、因易出现频繁的干扰及要求较大的微电源配备最低限度的通信设备。

5.3　独立微电网的主要保护问题

当微电网独立运行时，保护的考虑方式和联网运行时明显不同。本节将讨论假设微电网于公共连接点（PCC）处恰当隔离情况下的四种主要保护：

（1）配电系统故障保护。

（2）微电源保护。

（3）国家电气规程（NEC）规定的配电网变压器保护要求。

（4）中性点接地要求。

5.3.1 微电网配电系统保护

就该问题应充分考虑如下方面。

5.3.1.1 微电网中压系统保护

微电网中压区域（即主电网侧）内发生故障很容易消除，只需通过跳闸将所有微电源切除即可。然而，在制定任何中压区域的保护方案之前，必须认真研究中压故障对微电网运行带来的可能影响。另外，还要决定是否选择性地隔离中压故障，从而保持微电网其他部分运行，尤其是在发生二级意外事故（Second Contingency）时。将故障定性为二级事故意味着已经发生了一级事故，并已致使微电网独立运行，因此中压系统故障只是属于独立运行微电网的二级事故。

假设微电网是典型的就地有源低压配电系统，其中唯一的中压系统保护装置是配电变压器熔断器，位于用于连接主电网的中压／低压（MV/LV）变压器上。对于联网运行期间的中压侧故障，这些熔断器通常在主电网的故障电流（为最大负荷电流的 20～50 倍）下 0.1～0.2s 内快速动作。另一方面，因为低压侧故障产生的故障电流为熔断器最大负荷电流的 10～20 倍，故将其动作延时时间整定为0.5～1.5s。独立运行微电网保护系统的问题是故障水平的急剧降低。独立运行的微电网内出现水平相似的中压故障时，产生的故障电流仅为系统满负荷运行时电流的 5 倍，这相对于联网运行时 20～50 倍的故障电流小得多。因此，由于极端的反时限电流特性，配电变压器熔断器对此类故障的保护动作将非常缓慢，并且很难与微电源保护配合。

在这种情况下有两种选择：①微电网内发生中压故障时允许将整个微电网隔离；②在中低压侧安装额外的保护装置，以实现在微电网独立运行情况下与微电源保护系统的正确配合。第一种选择允许二级事故下的异常运行，这无疑是更经济的同时也是可以容许的，因为配电变压器的损耗并不会导致独立运行微电网发电量的额外损失，而第二种选择则涉及中压侧增置额外的断路器和继电器产生的费用。

中压侧故障会使微电网面临不同的复杂情况。如果故障发生在变压器中压侧，并且此时微电网与主电网联网运行，熔断器会由于大的故障电流而迅速熔断。虽然与主电网变电站断开了，但故障变压器依然与微电网相连。这样微电网会存在未消除的故障或者断相状态。再者，如果微电网之前已独立运行，那么产生的故障电流将不足以令熔断器动作而切除故障。

如果故障发生在微电网中压系统的主馈线上，就必须将其与主电网系统隔离以消除故障。如果微电网已经隔离，依然要将故障馈线断开以消除故障。如果微电网有集中式发电，那么有两种选择需要讨论：①接受由于二级事故的停运；②对集中式微电源分级增设额外的保护装置。然而，如果微电网周围存在另一台发电机或者分布式电源，则还有另一种选择：③在低压网络的合适地点安装继电器，以便微电

源可将其自身与中压系统隔离，并能继续给本地负荷供电。当然，微电网中微电源的位置不止一处时，如图 5-1 所示，方案②和③是合适的选择。

如果主进线馈线上公共连接点（PCC）处的继电器有足够的时间将微电网与主电网解列，那么微电源保护系统对微电网内的故障应有足够的动作时间延迟，从而避免由于主电网干扰导致的微电源发电量的损失。如果微电网内接地充分，足以防止发生过电压损坏，那么这类动作时间延迟就可以接受，因为微电网独立运行时的故障电流水平远比联网运行时要小。但是微电源保护系统无疑还需要一些其他特性，以作为 PCC 处将微电网隔离的后备继电保护。

对于微电网的复杂结构，通过智能保护协调模块（PCM）的保护配合可能更容易实现，而单一微电源保护系统能够不与其他保护装置配合即可保护分布式能源（DER）。这样的系统需要对线路或者馈线部分进行保护，通过相对简单的方向过电流继电器可以实现各馈线部分的配合。但是当微电网独立运行时，很难出现可以灵敏定位的大的故障电流，并且也很难让传统的方向过电流继电器自动适应由于微电网隔离导致的大故障电流转变为小故障电流这一情况。如果采用零序电流—电压继电器，保护的配合会变得困难。另一个困难是，微电源相对较高的阻抗可能导致相邻两个继电器的保护动作时间几乎相同，从而减少了保护的选择性。因此，每个电路部分必须采取差动保护方案以实现适当的选择性。而且，所有的保护装置之间需要高速的通信联系才能将故障电路切除。

5.3.1.2 消除低压故障的要求

传统保护装置动作的最大故障电流为最大负荷电流的 2～20 倍。通过时间电流继电保护的相互配合，使得距离故障最近的继电器先动作。距离故障最近的继电器为主保护，而其上游的则为后备保护。任何故障期间，当最大故障电流通过时，即使两个保护装置都检测到了故障的存在，后备保护装置的动作时间总是滞后于主保护装置。故障远离电源点时，利用故障电流的自然减弱实现时间级差配合。减弱程度取决于电源点到故障点之间输电线路/变压器的阻抗值。对于中压和低压配电网，使用反时限过电流（51㊀）和高整定值的瞬时过电流（有或无延时，即 50/2㊀或者 50㊀）继电器。这使得故障消除时间与故障到变电站的距离几乎成正比。

在故障研究中电源点可以视为无穷大电源。主要的问题是独立微电网在 MV/LV 变压器的中压侧不能看成无穷大电源，同时微电网电源的阻抗比变压器的阻抗要大很多。因此，随着故障离开中压而靠近低压系统，故障电流的变化会相对较小。这样，在之前介绍的过电流保护配合方案中，微电网从联网运行转变为独立运行可能会导致故障消除速度变慢以及使后备保护受到限制。这种影响是否明显，很大程度上取决于如下诸多变量：

（1）微电源的时间—阻抗特性是否会显示出次暂态、暂态和/或同步时间的影响。

㊀ 此为美国国家标准协会 ANSI 中的代号。——译者注

(2) 高整定瞬时过电流继电器的保护整定值，它与微电网最大故障电流相关。

(3) 在微电网的故障电流范围内继电器的反时限电流特性如何，即对于故障电流的改变，继电器的动作时间应有多少改变。

鉴于此，保护协调模块（PCM）要么在微电网从联网运行向独立运行转变期间改变/重新整定过电流继电器，要么适应整定值要求使一套设备同时适用于两种运行模式。

对微电网运行模式转换对传统继电保护的影响的一些观察表明，运行模式的转换未对后备保护和主保护之间的配合产生严重干扰，因为保护是按最大故障电流同时流过这两种保护装置配合的。此外，由于反时限过电流继电器的影响，使得在较低的故障电流时保护动作的时间裕度（Time Margin）会增加。如果故障电流比所采用的时间过电流保护功能动作值的 10 倍还要大，那么运行状态的转换对保护装置动作时间的影响不会很大，因为在此电流水平上，其时间—电流曲线只有相对较小的变化。然而，由于运行状态的转换，极端转换装置（Extremely Inverse Devices）的动作时间将发生明显变化。转换引起的故障电流的急剧减小，可能会对高整定瞬时过电流装置有很大的影响。故障电流甚至可能会降到这类设备的高瞬时整定值以下，在此情况下，原本几个周期就可消除的故障可能要用很长的时间甚至是完全不能消除。

一种匹配此两种模式下故障电流水平的方法是可以在公共连接点（PCC）处装设一台故障限制断路器。虽然它可以令微电网从联网运行模式到独立运行模式的过渡变得更加平滑，但是这样的系统将彻底改变保护系统的原理。目前，正在进行大量的研究，以开发在联网和独立两种运行模式下针对分布式发电的经济适用的继电保护方案。

5.3.1.3 微电网中分散的分布式电源

含有分散的分布式电源对微电网保护系统的影响必须与集中式微电网发电下的情况进行比较。在设计可靠安全的保护系统时，这是必须要考虑的。如果微电网中的分散电源类似于网状分布（即 PCC 处的微电网母线上没有集中电源），故障保护方案的改变就不仅要考虑到故障电流的减小（典型的如独立运行微电网），还要考虑在某些馈线上出现双向故障电流的可能。因此，如果故障发生在从（被控）DER（分布式能源）和主（主控）DER 之间，那么按照 P1547 规范的要求，从 DER 应与系统解列。如果从 DER 保护装置已经被设定为对 PCC 处主电网侧的故障不跳闸，那么实现解列将会很困难，因为在这种情况下很难检测出故障是在 PCC 的主电网侧还是微电网的主 DER 侧。因此，在 PCM 和微电网所有断路器之间的高速通信是实现选择性跳闸的唯一可靠方案。

5.3.2 微电源保护

设计可靠的微电源保护方案应考虑以下问题并需要开展大量的动态仿真研究对

其进行验证：

（1）对一个独立运行的微电网确定可接受的电压和频率的保护容许偏差范围。

（2）评估是否需要任何对分布式电源的反孤岛保护，如果这种保护存在，那么微电网独立运行模式下它如何被停用或者跳过。

（3）检验如果保护方案用于独立运行的微电网中时，反孤岛技术的存在是否会导致电压和/或频率的失稳。

（4）出于微电网自身的稳定性及其与主电网同样方案相配合的考虑，评估是否需要低频减载方案。

5.3.2.1 电压和频率窗口（Windows）的修正

微电网独立运行期间，虽然使电压和频率窗口（即容许偏差范围）变宽对于发电装机容量低的独立微电网似乎是可取的，但是在实施这一改变时，必须认真研究其对现有设备安全的影响。如果这些窗口初始的设定是作为防止所连接设备损坏的保护界线，那么最好不要改变窗口。并且如果只是设定为故障和孤岛检测水平，那么这种改变只有通过智能微电网中央控制器才能实现。

5.3.2.2 反孤岛效应

对于微电源是否需要反孤岛保护以及在电力电子接口处的反孤岛保护控制是否应该被停用，都必须要经过大量的动态仿真研究才能下结论。一般情况下希望停用这些控制，除非主电网的发电量与微电源的发电量的比值很大。然而，如果这些控制未停用，微电网就可能会变成不可控的孤岛。由于大部分反孤岛控制会导致快速跳闸，所以在检测到微电网成为孤岛时应立即停止反孤岛控制。实现这一效果的最有效方法是由微电网中央控制器发出能令反孤岛控制跳闸信号失效的闭锁信号。

5.3.2.3 负荷切除和需求侧管理

所有电力系统都被设计为能够处理由突发事件（如事故或设备故障）引起的局部或整个系统的过负荷情况。为应对这些情况，电力公司通常将一些负荷指定为非关键性负荷，通过断开这些负荷以避免系统电压和频率的降低，尤其是在发电能力或者联络线损失时。在系统受到干扰期间，通过切除负荷以及设计好的需求侧管理来保证系统电压和频率的稳定。为实现开断的灵活性，电力公司为非关键负荷用户提供了更为优惠的电价作为激励。电力公司与用户之间一旦就负荷切除达成协议，前者便可以通过其负荷切除系统快速而有选择地切除负荷，然后通过需求侧管理恢复供需平衡。

对于发电能力或者联络线的损失，系统通常表现为低频现象。在这种情况下，电力系统采用配有低频继电器的减载方案将非关键负荷切除，以使由于发电量减少导致的低频现象恢复正常。在极端情况下，还要使用基于低频继电器以及电力系统其余部分惯性特性的减载方案来恢复正常的频率水平，以这种方式切除的负荷通常是由配电变电站供电的负荷。选择的唯一准则是避免对关键设施供电的中断。通常，这些关键用户既不会从减载中获利，也不会被优先考虑切除。

在需求侧管理中安装减载系统总要受到技术、经济和政治因素的影响。而对于微电网，技术问题的本质取决于负荷是在其隔离前还是隔离后切除。微电网发展初期如果不可避免地要切除负荷，那么处理相关经济和政治问题时也可采用新的尺度。

如果微电网的边界存在非重要的低频减载负荷，那么其跳闸必须和微电网形成时所确定的低频分离点相配合。此配合仍取决于以下几点：

(1) 独立运行微电网的发电容量是否能够满足这些指定的非优先级负荷的需求。

(2) 如果微电网原本就设计为在联网模式下向这些非优先级负荷的全部或者部分供电，那么微电网过早的解列可能会导致主电网过负荷状况的进一步恶化。在切除负荷之前解列微电网，对于主电网来说将被视为重大的发电损失。

(3) 如果微电网未设计为在联网模式下对非优先级的负荷供电，那么在其解列之前必须将这些负荷切除，以便主电网有机会决定是否通过此负荷切除来恢复电量的供求平衡。

(4) 如果需要切除过多的负荷（即超出了为维持规定的电压/频率所需的负荷预设量）以保证微电网的稳定运行，就必须评估由于过量切负荷对解列后的微电网动态特性可能产生的影响。

如果由于公共连接点（PCC）和主电网变电站供电母线之间的故障或者设备事故导致的微电网强制解列，那么就需要实施切除微电网自身负荷的方案。由于微电网的惯性常数比主电网的要小，所以在制定切除负荷方案时需要解决以下技术问题：

(1) 需要检测在微电网中是否有主电网设置的负荷切除系统。

(2) 如果有这样的系统，则必须检测是否有负荷拥堵、时间延迟，以及整定值是否符合独立运行微电网的动态需要。

(3) 如果没有这样的系统，则需要检测由 PCC 断路器控制的低频跳闸是否有足够快的响应速度以确保微电网的安全。

微电网中由主电网控制的减载装置的最大优点是，如果由于故障导致微电网解列时，可实现对减载断路器的直接快速通信，从而实现快速减载，这将极大地弥补微电网的低惯量。

5.3.3 NEC 对配电变压器保护的要求

在为中压/低压配电变压器设计任何保护方案之前，应该仔细验证 NEC 对变压器过电流保护的要求是否适合故障电流更低的微电网。根据 NEC 第 450 条，变压器过电流保护的整定值可以设定为变压器额定值的600%。而且，大部分 NEC 推荐值都是以短路电流比最大负荷电流大 10 倍这一假设为基础的。但是由于独立微电网变压器的不同位置和额定值以及低故障电流容量，具有高设定值的变压器保护系

统可能根本无法发现故障，这可能使变压器对于短路故障几乎得不到保护。

5.3.4 中性点接地要求

中性点接地系统必须要确保微电网在孤岛状态下或者独立模式运行时得到有效的故障保护、绝缘完整性以及安全性。微电网中性点接地系统的设计和发展应考虑以下几点：

(1) 当中压/低压（MV/LV）配电变压器为△-Y 联结方式时，如何为独立微电网的中压系统提供有效的中性点接地。

(2) 如何向独立微电网的低压配电系统提供有效的中性点接地，尤其是当 MV/LV 配电变压器为 Y-接地/Y-接地的联结方式时。

(3) 如何做到微电网中压系统接地和向微电网供电的主电网馈线系统接地之间的相互兼容。

(4) 微电网中性点接地系统是否符合现有 DER 设施的接地要求。

设计微电网中性点接地系统需要对不同配电变压器联结方式带来的接地系统有效性和适用性影响有透彻的认识。

5.3.4.1 互联变压器的接线方式

大部分电力公司在其 MV 多点接地的 Y 形联结配电网中的配电降压变压器都是采用 Y-接地/Y-接地的接线方式。虽然这种联结方式有利于向传统负荷用户供电，但是这可能会给有互联微电源的微电网运行带来一定问题。对于微电网，更应该考虑其他的接线方式，例如 Y-△联结或者△-△联结。在确定配电变压器的联结方式时，必须考虑以下几个因素：

(1) 反馈电压和避雷器额定值。

(2) 接地继电器的配合。

(3) 馈线负荷不平衡。

(4) 馈线的接地继电器。

(5) 对接地变压器的要求。

(6) 低压系统故障电流等级。

1. 反馈电压和避雷器额定值

传统的中压配电网均为有效接地，对于 MV/LV 配电变压器通常中压侧为 Y-接地联结方式，而低压侧为△接线方式。整个系统的 X_0/X_1 比值通常小于或等于 3.0。因此，80% 额定值的避雷器可适用于沿馈线的任何地方，包括微电网的中压系统。由于微电源的存在，使得独立微电网的接地情况变得稍显复杂。如果在中压系统发生单相接地故障，微电网会在 PCC 处自动与主电网解列，从而将主电网变电站的接地源完全从微电网中断开，但是微电网中压系统将依然由微电源供电。在这种情况下，接地和可能的过电压状况将主要取决于微电源变压器的联结方式以及微电源本身的接地情况。然而，一台 Y-接地/△接线方式的变压器（低压侧为△接线）可

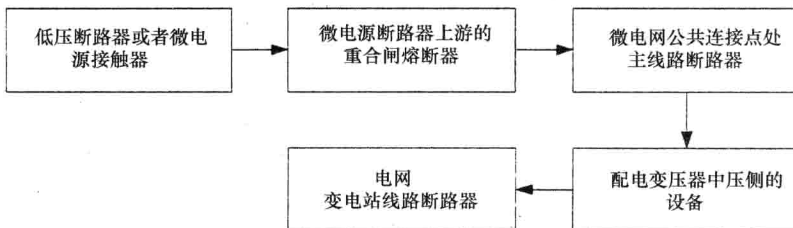
让中压系统有效接地并且 X_0/X_1 比值小于3.0，因此变压器本身提供了一个接地源。在这种情况下，80%的避雷器都是可以有效使用的。

Y-Y联结的变压器本身并不是接地源，而是零序电流的流通路径，因此，针对反馈情况的网状接地状况依赖于微电源本身的接地。如果是直接接地并且存在零序阻抗，那么 X_0/X_1 的比值将小于或等于3.0，因此可以安全使用80%额定值的避雷器。但是如果没有接地或者是经阻抗接地，那么 X_0/X_1 的比值将非常大，中压系统的健全相电压甚至可能超过正常的线电压。在这种情况下，应使用满额定值避雷器。△-△联结以及Y-△联结的变压器（Y形联结绕组应该连接在微电源侧）永远不会成为系统的接地源。对于这样的联结方式，应在馈线上连接接地装置（Grounding Bank）以限制过电压，或者将整条馈线上80%额定值的避雷器全部换为满额定值的避雷器。并且在采用相-中性线连接的变压器的微电网中，也需要认真研究过电压对其他电气设备的影响。

如果微电源为同步发电机，保持馈线有效接地（在中压系统接地故障时切除微电源期间）的一种方法是经电抗器接地，以保证系统 X_0/X_1 的比值小于或等于3.0。虽然发电机中性点直接接地更容易实现，但是在此情况下，单相接地故障电流将大于三相故障电流，这是由于发电机的 X_0 通常比 X_1 小。因此，大容量发电机不允许直接接地。小的微电源可能不会受到这一限制，但是制造厂家还是要考虑微电源在直接接地的条件下能否运行。

2. 接地继电器的配合

继电器、自动重合闸以及熔断器串联在配电线路上，它们应该协调配合以确保距离故障处更远的设备有更长的跳闸时间。对于微电源，应按以下顺序进行故障跳闸（跳闸时间从低到高排列）：



这意味着对于某些故障，最上游设备的动作时间可能会非常长。

如前所述，就联网运行的微电网而言，发生三相故障、相间故障以及连续的相接地故障，其保护设备可能不会有任何配合问题。因为在上述情况下相故障电流与负荷电流之间的比值非常大。但是这一比值对于高阻抗单相接地故障而言可能还不够大，从而可能导致故障检测灵敏度的降低。在这种情况下，Y-△联结的变压器由于能够阻隔零序电路，所以会比Y-Y联结的变压器更有优势。对于Y-△联结的变压器，当低压微电源系统发生故障时零序电流是无法流入馈线的。因此中压接地

故障继电器为了更快地动作可能会设置一个较低的动作电流，因为它们无需与微电源接地继电器配合。

3. 馈线负荷不平衡

在正常状态下大部分配电馈线的运行负荷几乎都是平衡的，但是由于一些故障（如有意或者无意地断开单相支路）可能会使馈线电流变得不平衡。在这种情况下，作为接地源的低压侧为△绕组（微电源侧）的 Y-△变压器很有可能会产生不平衡负荷电流。而采用变压器 Y 绕组中性点经电抗器接地的方案，可缓解馈线不平衡过电流的状况。安装的电抗器增加了变压器的有效零序电抗，从而减少了流过变压器的不平衡电流的百分值。虽然 Y-Y 变压器的情况没有 Y-△变压器严重，但是同样会受到由于馈线负荷不平衡带来的影响。

4. 馈线的接地继电器

(1) 对于馈线。由于 Y-△变压器低压侧的△绕组可作为自身的接地源，它可以将一些来自变电站接地继电器的零序故障电流分流。这不应该成为一个大问题，因为依然有足够的电流使接地继电器动作。但是如果①微电源短路产生了足够的电流 I_0 使得电源侧接地继电器根本不动作以及②由于熔断器保护使变压器断路器或者重合闸不能正确动作，就可能出现问题了。在这种情况下，快速跳闸元件的动作时间应稍作延迟，以保证在首次跳闸之前熔断器能够动作。

(2) 对于微电源。由于△-△联结以及 Y-△联结的变压器能够有效地将微电源零序回路与中压系统隔离，如果在变压器低压侧检测到任何零序电流或电压，则表明微电源发生了故障。检测中压侧是否发生接地故障需要测量变压器中压侧的 E_0、I_0或者两者都测量。在这种情况下，由于 Y-△联结变压器的 Y 形绕组是与中压侧连接的，在变压器中性点处安装一台电流互感器可以非常容易地得到 I_0。然而如果三角形绕组连接中压侧，那么通过与微电源连接的变压器中压侧的电压互感器开口三角可测得 E_0。对于 Y-Y 联结的变压器，可以通过测量微电源变压器低压侧的 I_0 和 E_0非常容易地检测到中压侧接地故障。较之 Y-△联结的变压器需要连接中压侧检测设备来说，这无疑是更经济的选择。然而，仅仅使用 E_0是很难确定是低压侧或中压侧发生了故障，虽然两种情况都要跳闸，但在对故障准确定位时可能会出现混淆。

5. 对接地变压器的要求

当微电源通过△-△联结或者 Y-△联结变压器互联形成有效的接地源时，较之改变主配电变压器的联结方式，安装接地变压器是更为经济的选择。在这种情况下，对接地变压器的阻抗要求在很大程度上取决于微电源的千伏安额定值。接地变压器的千伏安额定容量也会远远小于主配电变压器。安装接地变压器还允许选择 X_0的最优值，而不依赖于主变压器的阻抗值。

6. 低压系统故障电流等级

联网运行微电网低压系统的三相和相间故障短路电流的大小，并不会受到变压

器联结方式的影响。但是，对单相接地短路故障电流的影响却非常明显。根据微电源接地方式的不同，对于使用 Y-Y 联结变压器的系统，单相接地故障电流的大小通常为变压器满负荷电流的 15 ~ 25 倍。而对于 Y-△联结的变压器，其对应的故障电流要远远小于 Y-Y 联结的变压器，而且仅受到微电源中性线阻抗的限制。如果微电源直接接地并且中性点在低压侧，Y-△联结变压器的故障电流会受到微电源自身阻抗的限制。△-△联结变压器产生的故障电流等级与 Y-△联结组别的相同，而△-Y 联结变压器（Y 绕组连接在微电源侧）却能提供和 Y-Y 组别一样的电流。

5.3.4.2 接地系统的选择

由于任何特定的变压器联结方式都不具有优越性，微电网应该设计适合自身配电变压器互联方案的接地系统。如果采用 Y-接地/△变压器，那么微电网将保持有效接地，即使在微电网解列变为孤岛运行期间亦如此。但是如果使用 Y-接地/Y-接地变压器，那么接地的有效性将取决于微电源的接地系统，假设条件为它们都直接和同步发电机相连。如果微电源存在电力电子接口，那么将很难确定发生单相接地故障的微电网系统的阻抗特性。

但是，接地系统的选择通常并不是仅由 MV/LV 变压器联结方式决定的，还取决于主电网对接地配合的要求。如果需要，针对在公共连接点（PCC）处的隔离还需设计一些将接地系统快速接入的措施。

5.4 结论

微电网对保护的要求与传统的配电网以及传统的分布式能源（DER）有很大不同。不同之处在于微电网需要满足两个保护准则，即①主电网或相应技术标准对互联规定的要求；②为了维持微电网内期望的电能质量和稳定性而将微电网及时解列的要求。如果有任何与这两个准则相悖的，都应将其解决、协商或者容忍。

微电网保护系统的可靠运行要求独立模式运行的微电网有足够的故障电流容量，以便微电网中所有过电流设备流过的故障电流至少大于最大负荷电流的 3 ~ 5 倍。故障电流与变压器额定电流之比小于 3 也将违背 NEC 450 有关变压器保护要求的规定。只有当微电网中同步发电机或具有大故障电流传送能力的变流器的百分比高时才能满足上述规定。对于过低的故障电流，必须开发和安装那些不是基于过电流检测的保护方案，尽管其成本效益及效率存在一些不确定性。

保护设备的快速动作对于微电网保护系统的可靠运行至关重要。因此主电网变电站与微电网 PCC 处主进线断路器之间应该建立高速通信，以保证之前已有的不能承受误隔离的设备安全运行。而且如果分离时间小于 50ms，例如 3 个周波（SEMI F47 规定），PCC 处就必须安装固态断路器，这对于微电网的存在是必不可少的。对于高速跳闸，如果带特快跳闸真空断路器的甚快速继电保护（时间小于半个周波）的价格能够降到可接受范围，那么这可能是另一个好的选择。

对于 PCC 处保护设备的配合，主电网变电站和单个的微电源可通过智能保护协调模块（PCM）设备来实现，PCM 包含在用于维持微电网可靠运行以及尽量减少与主电网解列的 CC 中。这可能需要将用于输电系统的线路纵联差动保护方案，发展成为适合于配电系统的版本。保护系统和 PCM 设备的开发还需要有软件仿真和实验室规模的微电网模型，以研究在故障发生之前、故障期间和故障之后微电网电压和电流的动态特性。

第 6 章将讨论用于微电源及其控制的电力电子接口的发展。

第6章　电力电子接口

6.1　简介

微电源可显著增加发电能力。电力电子接口用于诸如微热电联供、风力发电机、光伏阵列和燃料电池等微电源。电力电子接口不仅输出主电网等级的交流电，并且还促进了微电源在微电网中的整体接入。然而，由于这些接口的技术和系统封装相当复杂，所以它们的成本很高。

为获得经济的性能，电力变换器通常可以定制设计。通过适当的设计可以增强电子电力变换器的适用性，并使其耐用、价廉、可靠而且可以互换。电力电子变换器最近的设计趋势包括类似于计算机体系结构的几个组件和数字电子技术的集成。为了提高电力电子变换器在分布式发电和微电网中的适用性和经济可行性，研究的重点是开发模块化体系结构。这就使得系统的电力电子解决方案在大规模生产中可以使用预制的组件。

这种模块化方法已经应用到模块-总线-软件（Brick Bus Software，BBS）框架的设计中，这种框架是由威斯康辛州电力系统工程研究中心（Power System Engineering Research Center-Wisconsin，PSERC）和威斯康辛州电力电子研究中心（Wisconsin Power Electronic Research Center，WisPERC）提出的。从命名可明显看出，这一框架包括三部分：①模块化变换器组件，即模块；②连接单元，即总线；③接口单元，即软件。这个框架的技术和实施的问题，以及其优点和局限性将在下面几节中讨论。

6.2　背景

电力变换器的设计和开发已经滞后于超大规模集成电路（Very Large Scale Integration，VLSI）微处理器的设计和微机系统的发展。但是，数字电子技术和计算机体系架构在工程、制造和系统设计中的发展可与电力电子技术领域中的发展相媲美。标准化的计算机体系架构总线接口为计算机行业的快速发展提供了框架。这启发了电力电子行业：在电力变换器设计中，设计者可以制定一个标准构架，就如超大规模集成电路和计算机体系架构的设计。尽管背景介绍和其中提到的两部分内容（标准的计算机体系架构和超大规模集成电路）超出了本书的范围，但接下来我们还是简要地介绍一下这两部分内容。从中我们可以看出计算机体系架构的快速发展

与电力电子行业的进步缓慢形成了鲜明的对比。

6.2.1　标准计算机体系架构

标准计算机体系架构由一组总线和系统组件组成，总线连接主处理器和其他外围设备，系统组件包括内存和输入、输出设备等。这种结构提高了灵活性，降低了成本。总线是一组使中央处理器和外围设备直接互连的专用低阻抗线，它能传输控制信号、数据信息和地址信息。总线集中的方式非常简洁而且高效，因此它是将所有的子系统直接连接到中央处理器。凭借行业标准总线架构及与多个计算机品牌具有兼容性，计算机外围设备制造商就可以利用这种产品的经济优势。因此，计算机可以从一定范围的制造商中选择新安装的组件或者更换的组件，计算机系统的灵活性变得很高。但这种方法的主要缺点是：通过总线的数据通信是一个瓶颈，对此通常用数据多路传输技术来解决。此外，这种方法迫使定制产品独立于市场之外，这导致在适应特定的应用需求时产生另外一个瓶颈，这显然不能满足现有的行业标准总线体系结构的要求。

用于计算机系统的总线集中方法和用于电力电子变换器的总线集中方法完全不同。在计算机系统中，总线特征由带宽和等待时间决定。而在电力电子变换器中，它是由功率变换量（Power Throughput）和功率密度决定的。因为要求变换器的功率额定值逐步增大，总线的可扩展性也非常重要。因此不像计算机行业，电力电子技术行业必须考虑上述所有因素，认真防范这一新风险。

6.2.2　超大规模集成电路

在微处理器的设计中，超大规模集成电路技术已经使制造流程趋向垂直方向发展，同样的技术也可以用于电力变换器的生产中。在超大规模集成电路的技术中，设计者可以在一个较高的水平上描述系统。基于软件的自动化工艺流程可以输出板图生成文件和晶片制造布局信息，从而生产出专用的集成电路。在这个自上而下的设计过程中，设计者可以在功能层面上设计系统，并未有任何指定的流程技术，同理，也可以用类似的方式定制生产电力变换器。这需要在功能水平上规定设计参数，从而在体系结构框架规则内生产一系列标准化的组件。此流程的实现需要在设计和制造环境中定义标准化组件和连接框架。

6.3　电力变换器的发展趋势

电力电子变换器制造工艺的发展滞后于计算机和微处理器的发展。电力电子变换器的一个主要挑战是其高的额定功率。尽管电力变换器的类型繁多，额定功率的要求也不尽相同，但是生产流程却是类似的。在电力变换器的制造中，行业的需求导致产生了自定义设计和功率模块的集成。

6.3.1 自定义设计和制造

电力变换器的自定义设计和制造是面向应用和特定需求的，因此，对不同的应用，需要做相应的改变。为了提高变换器的精确度，设计产品时要求采用合适的软件包进行电路仿真和印制电路板（PCB）布局。此外，还需要对其进行封装和装配的热特性、电磁特性及实体建模的有限元分析。在用户自定义设计的过程中，大多数生产层面通常都是手动进行，这导致成本很高。只有当变换器的尺寸相对较小、产量很大时，自定义设计和制造才经济可行。因为当产量非常高时，生产装配就抵消了生产成本。在自定义设计和制造过程中，非功能性故障组件的更换成本很高。因此，对于小尺寸的变换器，在发生元器件或子系统故障时，实际上对变换器整台更换较为经济。

大的电力变换器用于分布式发电（DG）系统和大功率电驱动设备中，在分布式发电系统中作为备用电源和功率调节使用。由于这些设备尺寸大，产量很小，使得自定义的设计和制造成本非常高。此外，整台变换器的更换和变换器元器件或子系统故障的维修成本也十分高。因此，较大的变换器的自定义设计和制造并非经济可行。

6.3.2 功率模块的集成和组件封装

功率转换装置的封装是一种有效提高电力变换器的性能、可靠性和功率密度的方法。如同绝缘栅双极型晶体管（IGBT）和反并联二极管的集成一样，集成功率模块（IPM）内有电力电子组件。这些集成功率模块将一些或所有的辅助电力电子功能，如门驱动、保护、辅助阻尼、逻辑、电源隔离、传感器和数字/模拟控制等集成在一个软件包中。为了避免装配成本过高，电感、电容、滤波器、风机、散热器和连接器等系统组件不能集成到 IPM 中。功率模块集成和组件封装主要受应用市场的影响。结果是，制造厂标准组件虽易于得到，但实际上不兼容且不实用。因此，实现电、热、体积方面设计紧凑的集成组件是非常困难的。人们已意识到有必要努力实现对 IPM 的配合封装，对部分划算的低/中等规模的电力变换器也如此。

6.3.3 电力电子积木

电力电子积木（Power Electronic Building Block，PEBB）的方式被用于通用功率处理器的多功能即插即用模块中，以实现更大的功率密度，该方式提出将电力变换器模块化组件作为 IPM 发展的一个延伸。组件集成的 PEBB 方式也仅限于在选择灵活性差的电力变换器中使用，但它的集成配合方式和虚拟实验台（VTB）软件工程环境对 BBS 框架有好的指导作用。

6.3.4 封装框架设计

封装框架设计主要专注电力电子技术方面的封装、设计和开发，未去探究系统

标准化的前景。然而，这产生一些对模块-总线-软件（BBS）框架方式很有用的构想。这是一种结合用户需求、封装水平、接口和通路，以及四种能量形式的四维设计方法。这个框架具有广泛的适用性，因为它解决了高度抽象的问题，解决了变换器大小和层次不同的问题，解决了变换器元器件和连接路径及不同形式能量和能量流的问题。一种面向对象的电力电子设备设计自动化软件，可能是一个更综合的集成模块化 BBS 框架自动化设计软件工具的基础。

6.4　模块-总线-软件框架

电力电子变换器基本上按每个负载的要求选取相应的电源。之前，与辅助设计方面相比，发展电力电子变换器主要考虑设备自身完善的问题，而设备自身完善主要是实现尺寸更小，切换频率更高等。辅助设计方面主要是完善连接通路、接口机制、封装和热管理等。但是，由于辅助设计在设计低成本、高性能变换器时具有深远的影响，所以最近受到更多的关注。

将三个部件从工程过程中抽象提升形成模块-总线-软件（BBS）框架，这三个部件为：①模块化组件，即模块，电力变换器的组成模块；②一系列模块之间直接互连的连接总线结构；③综合的软件环境，用于抽象地定义电力变换器，并且把这些信息按照预定义的模块和总线转化成工程文件和制造文件。BBS 框架可以称为电力变换器的设计编译器。变换器组件的电、热、机械的相互连接主要取决于模块 - 总线规范以及公共面对准（Common Face Alignment）中的几何相容性。它需要确保每个模块适当的功能运行，防止任何跨模块（Cross-brick）干扰、电气加载、电磁干扰、数据丢失、过度加热和机械错位等问题。上述的工程过程把拓扑结构层面的变换器设计自动转化成硬件规范，这可以方便地用于生产基于标准化模块和总线的电力变换器。BBS 框架有助于降低成本，提高使用中的可靠性和耐用性，带来性能的改善、更简洁的设计和更短的制造周期。

6.4.1　集成模块的模块化组件

电力变换器设计的 BBS 框架方法取决于集成模块作为模块化组件的商业可用性。但是，这种方法的成功实现是基于电力变换器子系统被再设计和再封装成模块的程度。这种设计促进了对大功率密度和电容密度的大量有效利用，也通过公共面对准促进直通总线的连接。已设计的模块型组件可以很容易地容纳一些典型的变换器元器件，如印制电路板（PCB）中的电力半导体模块、辅助门驱动电路和集成了矩形风冷散热器的门驱动电源等。然而，一些元器件必须再设计转换成进入模块的组件。6.4.1.1 ~6.4.1.7 节简要介绍了一些有用的典型变换器模块。

6.4.1.1　功率开关模块

功率开关模块是电力变换器的主要元器件。它包含功率流控制半导体设备，即

晶闸管、可关断（Gate Turn off，GTO）晶闸管、绝缘栅门极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Translator，IGBT）和金属氧化物半导体场效应晶体管（Metal-Oxide - Semiconductor Field Effect Transistor，MOSFET）等。功率开关模块的形状和封装取决于半导体技术。一个电力变换器部件对整流、逆变和直流电压转换等要求可能有不同的功率切换模块。为获得所需的额定功率，模块也可以串联起来使用。此外，它们还可能包含一些辅助组件，如门驱动、电源设备保护、隔离电源、信号隔离设备、散热器、传感器、电压去耦电容和阻尼器网络等。为避免散热时不必要的麻烦，IPM（集成功率模块）或 PEBB（电力电子积木）对于功率开关模块来说将是一个很好的基础。电源通过电源母线连接到功率开关模块，而传热总线的连接则依赖于热产生的程度。热产生的特性又决定于功率等级和吸收热的介质的特性。功率开关模块的设计和封装应通过合并局部电压去耦电容及合适的阻尼电路来避免任何交叉耦合与电磁感应。同时，通过对热的控制避免任何相邻模块的发热。功率开关模块不仅被设计为按照来自控制模块且经过控制总线的信号工作，并通过内部的传感器为控制模块提供反馈信息。传感器通常被设计用来检测设备的电压、电流、温度、风扇速度、外壳温度等。辅助功率模块通过控制总线的辅助电源线为功率开关模块提供所需的电力。

6.4.1.2 电压增强（Voltage Stiffening）模块

电压增强模块由用于直流去耦的电解电容、其他适宜交流去耦的电容和高频滤波器组成。这个模块可能包含一个限制电容纹波电流的 PI 滤波器的无源元件和用于反馈控制的电压及电流传感器。由于电解电容器主要是圆柱形的，因此在立方体的模块中加入这些电容器不能有效利用空间。但是，把电容器再设计和再封装成高密度且模块兼容的形状是不可能的。电源的连接通过电源总线而不是通过任何的传热总线，因为自然的空气冷却已足以进行温度控制。可以对传热总线进行显式连接以控制温度。

6.4.1.3 变压器模块

变压器模块由多个电感组成，它用于增强电流。为了置入模块组件中，大多数电感和变压器必须重新设计和封装，但是，E 形铁心变压器可以最为有效地置入模块组件中。变压器模块通过电源总线连接电源。一般情况下，对于温度控制不需要连接传热总线，但对于特殊的热需求，可以通过传热总线用显式热连接来实现。

6.4.1.4 控制模块

控制模块是电力变换器 BBS（模块-总线-软件）框架基于软件的大脑。它由如数字信号处理器的数字计算机和带有辅助组件的微处理器组成。辅助组件则如内存、现场可编程序门阵列（Field Programmable Gate Array，FPGA）、逻辑隔离电路、TCP/IP 的外部通信端口和无线通信等。控制模块通过控制总线按照控制局域网络（Control Area Network，CAN）总线通信规约和其他合适的通信规约进行实时数据通信。它从控制总线的辅助电源线获得电力；它需要屏蔽高频开关产生的电磁

干扰；对于任何温度控制的需求，它都能以显式连接到传热总线，分布式控制体系结构可以用于多BBS变换器的控制中；它也能与外部控制总线连接进行实时网络控制。

6.4.1.5　传感器模块

如果在其他模块中未嵌入足够的电压传感器和电流传感器，就可能需要有一个显式的传感器模块。在把探测点收集到的数据即刻转化为数字格式之后，传感器模块与控制模块通过控制总线通信，这提高了抗噪声干扰的能力。电源通过控制总线的专用电源线为传感器模块供电。出于必要的测量目的，它也可以连接到电力总线和传热总线上。

6.4.1.6　辅助实用模块

辅助实用模块由辅助变换器的硬件，如电磁干扰滤波器、涌流限制器、拨动式开关、继电器和断路器组成。为了通过专用控制总线的电源线给各种变换器子系统，如控制模块、门驱动、嵌入式传感器、传感器模块、功率开关模块、电压加强模块和变压器模块等供电，也可以包含辅助电源。通过连接适当的电源总线为辅助电源供电，也用于连接传热总线和控制总线的控制线路，前者用于温度控制，后者用于传送控制指令。

6.4.1.7　输入/输出模块

输入/输出模块用于容纳输入/输出功率连接和外部变换器连接。它们也可以容纳控制模块的外部控制信号连接和传热总线工作流体的外部供应渠道连接，即冷却剂输入/输出端口。

6.4.2　连接总线

BBS（模块-总线-软件）框架方法需要高速连接环节或总线来进行高效的通信，从而使数个变换器模块实现高性能的运行。总线的性能水平取决于变换器连通性在功能基础上的划分以及模块总线再集成的程度。就如传统的计算机体系结构，总线的连接架构在功能基础上提供电力变换器模块化构建的基础。电力变换器总线架构允许多条总线来处理电功率、散热、控制和传感器信息以及结构支持等问题。总线根据模块沿变换器一般表面的几何对直排列来设计。

6.4.2.1　功率总线

如前面几节所述，功率总线是不同类型模块之间的主要连接环节。功率总线的设计取决于功率额定值。平面设计因为具有较小的单位长度电感和电阻以及优良的高频电导率而更可取。在更高的功率额定值情况下，正如每个高级设计过程一样，蚀刻铜板、叠层铜母线堆可以和指定的连接一起使用。功率总线通过与压缩相关的结构总线连接，直接连接不同的模块。

6.4.2.2　传热总线

传热总线通过冷却介质（空气或水）流从发热点吸热，并在外部的散热器散

热。通过嵌入式控制或者控制模块控制流过模块的热表面冷却剂，以使热负载的影响最小化。在小的电力变换器中，模块可能有独立的散热器，这个散热器带有专用的可控风扇。但是对于大的电力变换器，传热总线通过网络管道将冷却剂引接到相应模块，从而确保可靠和防漏散热。

6.4.2.3 控制总线

控制总线在模块之间进行控制和传感器数据通信。控制总线的专用供电线从辅助实用模块中传送辅助电力。控制总线由带状电缆、印制电路板（PCB）或柔性印制电路形式的导体组成，并通过快速（Snap-in）连接器连接各个模块。控制总线传送5V的数字逻辑信号，控制总线屏蔽基于功率总线电磁感应的 dv/dt 和 di/dt。对于特殊的要求可采用光纤或无线连接。根据带有同步主时钟的控制模块来决定控制总线数据格式，CAN或其他合适的规约都可以用于网络控制。

6.4.2.4 结构总线

结构总线是包含几个总线连接和BBS变换器模块的镶嵌模块。结构总线的设计主要取决于变换器的物理尺寸。标准化铝或钢通道件的总线和模块用环梁（Central Beam）结构或矩形结构来封装。

6.4.3 高级软件设计环境

BBS框架的设计通常是在一种高级计算机辅助设计（CAD）环境下进行。为变换器的自动化生产提供足够的信息之后，制造商将基本变换器拓扑结构的图形布局和关键设计参数转化为电力变换器的生产文件。主要设计规范包括变换器拓扑结构、基本的控制框图和设计参数，如最大功率、电压和电流值、开关频率、滤波器的带宽、电压纹波和电流纹波的范围、可靠性指标和控制目标等。

CAD编译器按基本的变换器定义生成变换器生产数据（Converter Manufacturing Data，CMD）文件，CMD文件详细描述了超大规模集成数字系统或PCB的各个层次。它不以图形方式描述光刻或曝光工具坐标定义的布局；相反，它包含一系列用于变换器的模块清单及其通过不同总线连接的重要信息。通过总线制造和变换器封装装配的方式，制造商根据使用标准化BBS元件的CMD文件装配变换器。为了在设计过程中集成任何自定义组件，模块定义文件被引入到设计库中。从这个设计库中，自定义组件可以被手动插入到布局文件中。然后，布局编译器自动地把手动选择的自定义组件集成到生成的变换器设计中。

多数情况下，设计流程要求在制造之前进行变换器性能分析。借助于电路浏览器、热电路浏览器、控制拓扑浏览器和实体模型浏览器等，带有变换器元器件定义的CMD文件可以在一个较低水平上验证变换器的设计。如果有必要，可以提取低级变换器的设计数据来进行仿真或有限元分析，数据的提取可以借助如PSPICE、SABER、EMTP、MATLAB-Simulink、SolidWorks、ProEngineer和I-DEAS等任何一款软件工具，为了变换器设计的优化调整，设计者可以通过迭代法在图形布局中进

行任何修改。

6.5　BBS 框架问题

BBS 框架的实现需要解决一些问题。连接总线体系结构的封装元器件方法在模块化、尺寸比、寄生电感和包括电磁感应干扰和热干扰的交叉耦合和负载等方面有若干优缺点。这些将在 6.5.1 ~6.5.4 节中讨论。

6.5.1　模块化

BBS 框架方法的模块化为高级设计环境奠定了基础。它可以让变换器元器件的集成直接以电力、热力和体积测量的方法进行简洁紧凑的设计。元器件封装的标准化使元器件的更换和子系统的升级更为简单。元器件封装的灵活性也适应多种变换器应用的需求，还可以降低单位成本。

然而，与自定义设计不同，模块化方法对任何具体的应用并非最佳。这导致高的成本。中、大功率的变换器通过大量的生产可以承受这种成本，但是小功率的变换器就无法承受。由于变换器元器件和各种制造技术的不同，BBS 技术规范不像微处理器设计的过程那样在性质上是连续的，这个方面同样也会增加无效的成本。

6.5.2　尺寸比

尺寸比是变换器元器件模块的两个特征长度之间的关系，它与给定体积内的有效封装相关。因为电容的大小取决于额定电压和纹波电流，而与尺寸比没有太大关系，所以电容元件的高效封装存在问题。不同模块之间的高度要求是相互矛盾的，这导致尺寸比不匹配，也导致变换器的容积利用率低。因此，在 BBS 框架中，为了变换器的高效容积封装，尺寸比的问题必须解决。

6.5.3　寄生电感

寄生电感是在总线结构和模块化组件之间不希望发生的相互作用的产物，它能引起 BBS 框架变换器的性能障碍。最常见的是半导体开关器件和直流总线上的去耦电容之间的寄生电感对电压峰值、谐振和增大高开关频率下开关损失的影响。由于电压增强模块和功率切换模块之间的传导路径减小，所以总线集中变换器的布局优于自定义变换器，而且，这种布局也可以降低寄生电感。然而，在 BBS 框架变换器中，最小化尺寸比和寄生电感的影响是相互矛盾的，所以为使上述影响降到最低，需要作出一个折中的选择。

6.5.4　交叉耦合和负载

BBS 框架中的总线连接架构的目的是最小化任何模块和总线组合之间的意外耦

合及负载。由于模块与模块相邻，所以必须使电磁干扰和热干扰的影响最小化。

6.5.4.1 电磁干扰

由于电磁能量从功率开关模块和电力总线中向外辐射，所以会产生电磁干扰现象。通过控制模块和传感器模块之间的控制总线数字信号流会受到电磁干扰的影响，可能的补救措施是通过尽量缩短功率总线、功率开关模块和控制总线之间的连接路径长度，对敏感的模块和总线进行电磁屏蔽。

6.5.4.2 热干扰

热干扰可能发生在 BBS 框架变换器的功率开关模块、电压增强模块和其他热敏元件之间。冷却系统应该在多个模块系统的闭环传热总线中有效地减少热负荷。闭环传热总线中的反馈控制回路对所有热敏元件的有效冷却而言是一个可能的解决方案。

6.6 结论

变换器设计的 BBS 框架方法基本包含三个主要元件，即①模块——模块化组件，即组成实际变换器拓扑结构的元器件；②总线——连接体系结构，即模块之间相互连接的线路；③高级软件——抽象地描述变换器以生成自动化工程和设计文件的环境。

这种方法有着改进目前变换器设计的巨大可能性，优点是降低成本、提高可维修性、加速性能改进、简化设计、优化制造和缩短装配周期。

为了这个领域的深入研究，必须平行规划一些流程，即①新一代电力电子设计环境的开发；②基于设计环境的大规模自定义生产过程的开发；③在与功率转换过程兼容的适宜平台上即插即用控制方法的开发。

值得一提的是，电力电子市场自身已趋于成熟，特别是电动机驱动器、UPS 和其他变换器的市场。但是，不像先进的计算机和微处理器体系结构那样，大多数现有的电力电子器件的设计和制造并不基于模块化方法。因为微电网的成功在很大程度上取决于高效的具有成本效益的电力电子接口的使用，所以电力电子设备模块化的生产方法在微电网的发展中将被广泛接受。

微电网和主动配电网的电力电子接口的功能与同一区域内的数据采集与监控（SCADA）系统及通信基础设施的发展直接相关。第 7 章将论及微电网管理中的 SCADA 和通信。

第 7 章 SCADA 和主动配电网

7.1 简介

配电网络运营商（DNO）习惯于在电网管理中采用监控和数据采集（SCADA）系统。微电网和主动配电网的成功取决于是否能够将高效而经济的 SCADA 系统应用在网络管理的通信和运行控制上。随着分布式发电（DG）的逐渐渗透，由于一些电网方面的限制，例如电压限制、热过载和硬件连接的复杂性，单个分布式能源（DER）的网络接线方式正变得日益复杂。这些限制和复杂性已成为未来发电并网的障碍，故使主动配电网和微电网成为能够产生成本效益的解决方案。这也是英国天然气和电力市场办公室（Ofgem）提出的一个首选方案。在 11～132kV 电压的微电网和主动配电网中，运用具备适当主动控制模型的 SCADA 系统将是最好的解决方案。

本章以下各节简要讨论了 DNO SCADA 系统、微电网 SCADA 系统和主动式电网管理中的基础通信设施。

7.2 现有的 DNO SCADA 系统

基于 DNO 的 SCADA 系统通常协调远方变电站和控制室之间的通信和控制动作。这样方便了断路器和电动隔离器的远程操作。

第一代 SCADA 系统在 20 世纪 60 年代运用于老式电话技术、状态变化报警和有人值班的变电站。

第二代 SCADA 系统在 20 世纪 70 年代使用了工作在轮询模式下的远方终端（RTU）技术为控制室提供信息。

第三代 SCADA 系统始于 20 世纪 80 年代，采用了更为先进的技术，比第二代系统具有更好的带宽效率。

SCADA 系统主要用于控制带有宽带局域网（LAN）、电压等级高于 6.6kV、通常位于偏远地点的电网。SCADA 系统的功能可包括数据采集、数据处理、远程控制、报警处理、历史数据、图形化人机界面（HMI）、紧急控制开关、需求侧管理的负荷规划工具等。在较高的电压等级下，例如 132kV 及以上时，SCADA 系统因其有着多重路径而相当安全和稳健。由于 DNO 可以在人口密集的城市和分散的农村电网中运行，DNO SCADA 必须采用经济、可用且具备多种特性的通信通道，即

模拟电路，低频带宽达到 2400Hz，用于 132kV 重要站点和多站点的双重路径，且每条接线装有 10 余个 RTU。在 SCADA 系统中会使用多个通信电路的组合，如专用引导电缆（Private Pilot Cables）、租用的光纤和铜芯线路、移动电话技术和无线电技术等。现有的通信结构主要是基于铜电缆，它并不如光纤电缆可靠。但是这些光纤电缆是相当昂贵的，而且在大部分可再生能源 DER 分布的农村并不能广泛使用。因此对于 DNO 来说，连接 DER 和微电网的通信基础设施是一个重大的挑战。

DNO 使用若干多功能远方终端，其功能包括转换开关的时间标记、最大准确度为 1ms 的报警、具有可编程脉冲持续时间的数字输出（DO）、智能继电器连接和可编程逻辑序列。

7.3 DNO SCADA 系统的控制

由于主动配电网的管理依赖于 SCADA 系统，故需要在 SCADA 系统控制方案实施之前对长距离数据传输量进行审查。通信通道长度的增加可能会给数据的可靠传输带来风险。因此，主动配电网管理问题解决的关键在变电站，而不是在远方的 DNO 控制室。通常情况下有两种控制方案，即使用集中式控制和分布式控制。这些控制方案的优缺点将在 7.3.1 节和 7.3.2 节中进行讨论。

7.3.1 集中式 SCADA 系统

SCADA 系统的一些功能需要进行集中控制，例如低频减载顺序的调度和负荷侧管理。但主要的挑战在于用合适的通信基础设施进行可靠的数据传输。33/11kV 变电站可能在某些地方有 RTU，但 11/6.6kV 变电站可能没有 RTU 以及其他通信基础设施。这将导致灵敏度低的 SCADA 系统的开关变化检测（Detection of Switch Changes）变慢。集中式 SCADA 系统可能有排序能力、网络拓扑图、资产数据库、硬件和软件维护设备、集中管理的配置控制等，这些有助于实现未来智能顺序操作。然而，它可能会在某些方面存在困难，例如缺乏经济的通信基础设施、反应迟缓导致不合时宜的顺序操作、物理距离测试上的瓶颈和单点故障风险。

7.3.2 分布式 SCADA 系统

分布式 SCADA 系统由位于不同变电站的小型 SCADA 系统组成，这对于单个设备的管理和发电次序方案来说也许更具优势，这些任务可以通过专用的支持和监控工作站来进行分配。然而，分布式 SCADA 系统可能具有以下优势：经济的模块化可重复逻辑程序、低成本的具有异常报告无线电系统的通信基础设施以及在开关操作时更好的响应时间等。但是它也存在一些困难和挑战，也就是与集中式 SCADA 系统不兼容、需要额外的维护设施，同时满足多个分布式操作的经济的管理工具的可行性，以及为了修改逻辑进行实地考察而另外增加现场工作人员的要求。不过这个应用是依赖于技术的，它的适用性以及成本效益主要还是取决于 SCADA 解

决方案的重复性和复杂性。

7.4 微电网中的SCADA系统

微电网中的SCADA系统是一个中等规模的分布式系统，监控着发电、产热、存储设备、配电及其他辅助服务。它包括输入/输出（I/O）信号硬件、控制器、网络、通信、数据库和仪器范围内的软件。SCADA系统通常是指一个中央控制系统，它监视和控制一个完整的区段或长距离分布的系统。其主要的控制操作是由RTU和/或可编程序控制器（PLC）自动执行。但是，主机的控制功能通常仅限于其覆盖的基本区段或者管理级别上。如果有必要，SCADA系统会始终授权专业操作员来执行任何手动的控制，以取代自动控制功能。SCADA系统从RTU和/或PLC处获取必要的反馈信号，通过闭环控制来实现监测和控制的功能。数据采集始于RTU或PLC级的通信信号，在每次仪表读数和设备状态需要时使用。然后这些数据经过编译、处理，并通过HMI提供给控制室运行人员。运行人员最终使用这些数据做出必要的监控决策来调整或取代常规的RTU和/或PLC控制，也可以将数据收集起来建立数据库管理系统（DBMS）用于趋势预测和其他的分析工作。

SCADA系统通常以标签数据库的形式来实现分布式数据库，标签数据库内含有称为标签或点的数据元素。一个点代表由系统监控或控制的单个I/O值。点有两种类型，分为“硬点”和“软点”。硬点代表实际连接到系统的输入或输出点，而软点是其他点逻辑和数学运算的结果。在大多数情况下，它们都被简单地视为点。点值通常在经过记录或计算后以数值-时间标记组合（Value-timestamp Combination）的形式储存，一个点的历史记录就是一系列的数值-时间标记组合。有时，额外的元数据也通过标记，即到达现场设备的路径、PLC寄存器、设计时间说明及报警信息来储存。微电网中的SCADA系统基本上是一个分布式控制系统（DCS），可以由单一的供应商安装，但通常的做法是从有发展前景的公司购买不同的组件，然后将它们通过以太网通信加以组装。

关于SCADA系统的详细讨论不在本书范围之内。但是，为了解其在微电网和主动配电网管理适应性上的优势和挑战，SCADA系统的基本功能在以下几节作了简要的叙述。

7.5 人机界面

人机界面（HMI）是一种将处理后的数据提供给操作人员进行监控操作的装置。人机界面对于以标准化的方式监视和控制众多远程控制器（即RTU、PLC和其他控制设备）而言，始终是一个基本要求。通常情况下，PLC是分布在一个设备上，在流程中执行程序化的自动控制。PLC使得HMI难以直接从它们那里为操作者收集到可用的数据（Presentable Data）。通过标准化网络从PLC和其他控制器

收集到信息后，SCADA 系统将处理过的数据提供给 HMI。HMI 也通过 DBMS 系统连接到一个数据库来获取诊断数据、定期维护程序、物流信息、特定传感器或机器的详细原理图以及故障诊断专家系统指南。在很长一段时期内，各大 PLC 制造商提供的集成 HMI/SCADA 系统主要是使用非专有的开放通信规约。市场上也有各种专门的第三方 HMI/SCADA 兼容包用于连接大部分主要的 PLC，使得工程师和技术人员无需使用任何特制的标准软件包来配置他们自己的 HMI。SCADA 系统的主要优点是其适用于广泛的应用领域，从室温控制到核电厂控制都可以，因为其有较高的兼容性和可靠性。

7.6 硬件组件

SCADA 系统由不同的 DCS 组成，即智能 RTU 和 PLC，它们在无需主机介入的情况下能够执行简单的自主逻辑流程。功能模块编程语言 IEC61131-3 被广泛用于开发在 RTU 和 PLC 上运行的程序。不像 C 和 Fortran 程序编程语言那样，IEC61131-3 凭借其与传统的物理控制阵列类似的特点，只需要很少的培训，就能使得 SCADA 系统工程师在 RTU 或 PLC 上进行程序设计和执行。

SCADA 系统的四个主要组成部分为：①远方终端（RTU）；②PLC；③主站和 HMI 计算机；④SCADA 通信基础设施。

7.6.1 远方终端

SCADA 系统最重要的功能之一是以数字状态点的形式指示出 NORMAL（正常）或 ALARM（报警）从而发出警报，当达到某一预先设定的条件时就会发出警报，警报提醒 SCADA 系统操作员关注某些需要重视其控制动作的系统部分。备份信息也随着报警激活一起发送给报警管理员和 SCADA 系统操作员。

RTU 是一种装置，用于连接 DCS 或 SCADA 系统的实际受控对象，通过传输遥测数据到系统和/或根据从 SCADA 系统或 DCS 接收到的控制信息改变/控制对象。典型的 RTU 由一个可能是串口、以太网、专用的或任意组合的通信接口，一个简单的处理器，一些环境传感器，一些超控开关，与设备和/或接口板通信的设备总线或现场总线组成。有时设备总线或现场总线也用于 RTU 与主机系统以及现场设备之间的互连。在不同的输入范围、冲击电压保护能力和接口智能水平等情况下，接口板均能够处理模拟、数字或这两种类型的 I/O 信号。某些 RTU 或 PLC 可以在设备的监测和控制之间没有任何总线接口的情况下通过集成接口直接连接到系统。

接口板通常通过线路连接到物理被控对象。在大部分的 SCADA 应用中，大电流容量继电器连接到一个 DO 板来开合现场设备。模拟电路输入通常是 24V，电流范围为 4~20mA。RTU 将这些输入的数据转换成适当的标准信号，送入 HMI 或 MMI（人机界面），RTU 根据 SCADA 或 DCS 系统的信号使用 DO 板来执行任何控

制开合的操作。现代 RTU 可以在没有 DCS 或 SCADA 系统主机介入下自主地执行简单的程序，从而为安全提供了必要的冗余度。维护操作员通过开关操作可以修正现代 RTU 的行为，从而确保操作和控制过程的安全。RTU 和 PLC 在操作上正逐渐重叠，综合了相似的控制特性，并提供了特有的替代选项和相关的开发环境。

7.6.2 可编程序控制器

PLC 是一种用于工业流程自动化的电子设备，例如工厂装配线上机器的控制，被设计用于在污秽或有灰尘的条件下较宽的温度范围内运行。它们的设计与通用计算机不同，能保证其免受电气噪声、振动和其他冲击的影响。对应用于微电网中的 SCADA 系统也是一个合适而有效的工具。PLC 是一种由软件操作的数字继电器的集合，该软件存储在后备电池动态随机存取存储器（DRAM）或可擦除只读存储器（EPROM）内。它在一个时间范围内实时产生与输入情况相对应的输出结果，来减轻进程控制中的任何故障。PLC 具有专用的 I/O 排线连接 PLC 与传感器和执行器，用以读取限位开关、模拟过程变量，如温度和压力以及比通用计算机复杂的定位系统的位置。一些 PLC 甚至使用了机器视觉（Machine Vision，MV），MV 是计算机视觉在工业和制造业上的一种应用，主要用于机器的图像处理。在多数情况下，它需要数字 I/O 设备和计算机网络来控制其他生产设备，例如机械臂。它包含了计算机学、光学、机械工程和工业自动化，主要应用在产品的检测上，如半导体芯片、汽车、食品、药品，就像人类检查员在检查一样。通常 MV 系统执行预定义的任务，例如对传送带上的物品计数、读序列号、寻找表面缺陷等。制造商都热衷于使用 MV 系统以进行需要高速、高倍率、24h 运行并且重复的视觉检测，代替人员检测以减少较高的人为故障。

PLC 借助于在内置的 I/O 硬件或嵌入 PLC 中连接到计算机网络的外部 I/O 模块，使用执行器来操作电动机、气动或液压的气缸或隔板、电磁继电器或电磁阀以及模拟输出等。最初的 PLC 代替了需要使用数以千计的继电器、凸轮定时器和鼓状定序器（Drum Sequencers）的自动化系统，PLC 固有的编程能力使得单个 PLC 能够取代数以千计的继电器。它可以通过仅仅改变固件中的软件代码而具有相当大的操作灵活性，大大减少了 PLC 在任何控制过程中的变更造成的巨大成本。

PLC 的功能包含顺序继电器控制、运动控制、流程控制、DCS、网络等，它在数据处理、存储、计算机处理能力、通信能力等方面具有很好的相当于台式计算机的能力。在类似 PLC 的程序结合远程 I/O 硬件帮助下，通用的台式计算机也能取代一些特定应用中的 PLC。按照国际电工委员会（IEC）标准 IEC 61131-3，PLC 可以用带有附加图形编程符号功能的标准编程语言来进行编程，例如有些 PLC 的顺序功能图（SFC）。HMI 擅长于给控制流程和 SCADA 系统间的 PLC 控制行为提供接口。PLC 至少可以为 RS232 提供内置的通信端口，RS485 和以太网传输控制/

互联协议（TCP/IP）可以作为备用选择，Modbus 则是可用的最低通用标准通信规约。

7.6.3 主站和人机界面计算机

微电网 SCADA 主站由负责与现场设备（RTU、PLC 等）通信的服务器和 HMI 工作站组成。对于较小的 SCADA 系统，一台个人计算机（PC）可能就足够了，但在较大的 SCADA 系统中，主站可能包括多个服务器、分布式应用软件以及事故恢复站点。在 SCADA 系统中收集的所有数据以模拟图的形式保存，通过必经的 HMI 计算机接口图形化显示在主站，由操作人员来获得必要的信息并进行手动控制。模拟图包括线形图和原理图符号，这些符号代表流程元素或用动画符号表示的流程设备的数码图片。SCADA 系统的 HMI 软件包通常提供一个绘图程序用于操作者或系统维护人员在接口中对系统的图形化显示进行最优化的修正。这些显示的简单或复杂程度取决于系统在控制下操作的复杂水平。目前所有主要的操作系统既用于主站服务器也用于 HMI 工作站。

目前 RTU 需要在没有主站或人工操作员介入的情况下自主运行，以控制与安全相关的任务。通常情况下，主站在给操作员发出任何命令之前要进行数据分析。现在对于主站和 HMI 软件强制要求严格的安全标准，SCADA 系统硬件需要足够坚固，以承受极端的温度、振动和电压。SCADA 系统的引入给硬件和通信通道带来裕度，而保证了可靠性的提高。硬件任何部分的任何功能故障可以由备份硬件自动代替处理，故障部件可以在运行不中断的情况下进行更换或修理。

7.6.4 SCADA 通信基础设施

SCADA 系统一般会使用无线和直连串口或调制解调器连接的组合来满足通信需求。Ethernet 和 IPs 主要用于同步光纤网络（SONET），特别是在大规模场合，如铁路和电力系统。SCADA 系统应用的主要问题是由于缺乏标准造成初期低带宽规约遗留下来的。此外，SCADA 系统规约正变得日趋紧凑，许多规约被设计为只能通过 RTU 轮询来向主站发送信息。典型的传统 SCADA 系统规约主要是销售商定制，如 MODBUS、RP-570 和 Conitel。这些通信规约都是 SCADA 系统销售商定制的，而不像标准规约 IEC60870-5-101 或 104、Profibus 和 DNP3 那样。这些主要的通信规约基本上被标准化，大部分被所有主要的 SCADA 系统销售商所认可。虽然在 SCADA 系统通信中没有使用 Internet，这些通信规约中的大多数通过扩展后可以在 Internet TCP/IP 上运行，这也是一个可以大幅减少受攻击面很好的安全工程经验。由于 RTU、PLC 和其他自动控制器设备是在全行业互操作性标准颁布之前开发的，因此，为了 SCADA 系统和可用的控制器设备间的正确通信开发了大量的控制规约。为了锁定客户群，较大的销售商总是试图创建自己的规约。

7.7 SCADA 的通信发展趋势

PLC、HMI 和 SCADA 软件的基本趋势是更多的“混合和匹配”。早在 20 世纪 90 年代中期，由 I/O 制造商提供的典型数据采集系统，在适当距离的载体，即 RS232C 和 RS485 上加载其专有通信规约。在 20 世纪 90 年代后期，I/O 制造商开始通过支持开放的消息结构提供开放的通信，如 RS485 上的 ModiconModbus；直到 2000 年，大部分的 I/O 制造商提供完整的开放接口，如 TCP/IP 上的 ModiconModbus。在工业自动化内引入以太网 TCP/IP，例如判定论、同步、规约选择和环境适用性，由于安全原因，特别是在少数极为特别的应用里面这仍是一个问题。但市面上大多数的 HMI / SCADA 系统使用 Ethernet TCP/IP 时不会考虑安全隐患。

然而，因为面临网络战/网络恐怖攻击的概率很高，基于 Ethernet TCP/IP 的 SCADA 系统是非常脆弱的。由于大多数的 SCADA 系统至关重要，这样的攻击可能会导致数据丢失、实际的物理破坏、滥用或盗用而带来严重的经济损失。它甚至可能直接或间接导致生命周期缩短。尚未注意的是，SCADA 系统的未来趋势要么继续使用低成本且高效的 Ethernet TCP/IP 来进行通信而忽略其较高的网络受攻击性，要么选择更安全但成本高的架构和配置。众多安全制造商已经开始着手通过开发专门的工业防火墙和虚拟专用网络（Virtual Private Network，VPN）方法来解决基于 TCP/IP 的 SCADA 网络风险。VPN 是一个私人通信网络，一些公司或组织时常用来在公共网络下进行保密通信。VPN 的通信可能使用一个公共网络设施即标准规约之上的 Internet，或在 VPN 客户和服务供应商间已经定义的服务水平协议（Service Level Agreement，SLA）下，使用服务供应商的私有网络。VPN 能够通过两个预定义点之间安全加密的私人通道传送数据，如语音、数据、视频或这些媒体的组合。

7.8 分布式控制系统

从本质上来说，分布式控制系统（DCS）是一个对制造系统、流程或任何类型的动态系统进行控制的系统，控制器元素分布于整个系统中，每个子系统部件受一个或多个控制器的控制，而不像中央控制器系统（CCS）那样。SCADA 的最新趋势是使用 DCS 来进行通信和控制。整个 DCS 可能通过通信和监测联成的网络应用在工业、电力、计算机和土木工程上，用来监视和控制分布式设备，根据有无远程手动控制分为半自动或自动控制模式。

DCS 通常采用带定制处理器的计算机，它的控制器既要能够使用专有的互连设备进行通信，又要能在开放的通信规约下通信。I/O 模块是 DCS 和处理器的组件，是控制器从输入模块接收信息并发送控制命令信号到输出模块的一部分。输入

模块从受控流程的输入设备接收信息，而输出模块则发送控制命令到现场输出设备。计算机总线或电气总线通过多路复用器/信号分离器以及接口将处理器和模块与 HMI、中央控制主机和 SCADA 系统互连。

DCS 系统被广泛应用于各种行业的控制解决方案，如：①电网和发电厂；②环境控制系统；③交通信号；④水利管理系统；⑤精炼化工厂；⑥医药制造业；⑦传感器网络。该解决方案的广泛架构包括与物理设备的连接，例如开关、泵和阀，或者通过一个二级系统的连接，如 SCADA 系统。通常，DCS 解决方案不需要任何人工的介入，但是为了与 SCADA 系统连接，需要有经验的操作人员介入以提高可靠性。典型的 DCS 系统由分布式数字化控制器组成，它可以在一个控制箱中操控大量的标准控制回路，其 I/O 设备与控制器整合在一起，以其强大的计算能力、比例-积分-微分（PID）控制以及逻辑和顺序控制通过现场网络进行远程控制。它可能运用数个可配置的工作站，本地通信则通过双绞线、同轴电缆或光纤电缆的传输由控制网络来处理。一个带有应用处理器的服务器可以包含在系统中用于增强计算、数据收集和报告的能力。

7.9 变电站的通信标准化

为研究制定电力生产过程中系统和设备间通信的国际标准，并在其中并入电力系统控制中的遥控和远方保护方面的内容，20 世纪 60 年代初期成立了国际电工委员会 57 技术委员会（IEC TC 57）。在研发中，不仅需要包括设备层面，同时也需要包括 SCADA 系统、能量管理系统（EMS）、配电管理系统（DMS）、配电自动化（DA）、远程保护和相关通信等的控制系统参数。专家确认，电力公司之间日益激烈的竞争是由于能源市场管理的缺失，可见通过设备和系统的集成来支持电力公司的核心流程的必要性。它控制着通过系统组件、接口、规约和数据模型之间的互操作性和兼容性来形成集成系统解决方案的电力生产流程。基于美国的电网通信架构（Utility Communication Architecture，UCA）也已采取了类似举措，为接口、规约和数据模型的实施提供了参考标准。IEC TC 57 很可能采用这些参考标准作为 IEC 61850 标准的一套子标准。通信标准化的主要目的是在系统和销售商之间能够达到功能、硬件和软件接口、规约、数据模型等方面的互操作性和互换性。

变电站继电保护和计量系统发展所面临的主要挑战之一，就是其组成设备之间的通信能力以及在通信方法中如何适应不断的进步和变化。终端用户遇到瓶颈和挫折的主要地方在于如何从市面上众多不兼容的专有通信方法和系统中作出最经济、低风险和高效率的选择。通信接口主要从以下方面获取数据，包括交流电压和电流计量、电力系统和继电器状态报告、事件记录和为干扰分析而收集的示波器数据、灵活智能电子装置（IED）内大量整定值的检查或修改等。一些 IED 也能够执行基本的远程控制功能。为了留住自己的客户，大部分参与竞争的 IED 制造商更愿意

使用他们特有的方法来设计通信接口电路，其中包括与计算机进行通信的多种类型的串行端口。一些 IED 制造商设计了将一个变电站中的多个设备连接到单个本地或远程主机上的单独网络，这又是一个防止用户与同类竞争产品互联的独特方法。即使在市场上有多种高效的通信技术情况下，这一方案也限制了终端用户能够得到最优质的服务。

在融合一个变电站中所有 IED 的通信能力方面，用户有着持续的需求，在一个完整的电网中更是如此，它将促成广域网的互联以提供数据采集、整定能力以及远程控制。此外，多个智能电子装置（IED）可以同时参与到高速的数据共享和控制指令中，一起执行分布式保护和控制功能。这种协调的控制运行可以取代和消除大部分的专用控制线路以及昂贵的专用通信通道，从而实现集中式系统监控。系统集成商需要采用高效而昂贵的网关或编译设备，用来将所有的数据从各种通信语言转化成一个通用的格式。

7.10 SCADA 通信和控制体系结构

SCADA 通信架构可以为数据采集和控制提供往返的通信途径，通过变电站的 IED 使得微电源变电站内部的局域网得以实现。庞大的信息技术（IT）市场中丰富和高效的产品能够为变电站的 LAN 提供服务。正如 IEEE802.3 标准所指出，Ethernet 在通信领域是非常强大和普遍的。然而，商务办公和变电站对于 IT 的要求极为不同。办公 IT 只需要很少的数据服务器和数个微不足道的点对点的数据客户即可。相反，微电源变电站中的 IT 需要提供 LAN 以确保多个点对点通信，在只有少量数据客户的情况下支持众多数据服务器。再者，微电源变电站的工作环境要求组件和设备相当稳定，足以确保在任何不利的情况，如在冰雹、阳光直射和其他自然灾害条件下能够可靠通信。因此总的来说，需要确保这个变电站 IT 的通信和控制架构的安全性、确定性、可靠性和可维护性。

7.11 通信设备

对一些经常使用的通信设备简述如下：

（1）集线器——集线器是一个多端口的设备，它将从每个端口上接收到的全部数据转播给其他所有端口，它工作在物理层而不使用任何路由动作数据。

（2）交换机——交换机是一种智能多路复用设备，它工作在开放式系统互联（Open System Interconnection，OSI）网络模型的数据链路层，用来监视从端口接收到的数据然后决定如何处置。任何不完整或难以辨认的数据都会被交换机忽略，而完整的数据包则会被转发到其他合适的端口。有些交换机可以在网络层或传输层上打包数据。

(3) 路由器——这是一个智能化、多路复用的复杂设备，用于连接两个网络。它工作在 OSI 网络模型的网络层，被设计为忽略段内流量并将段间流量发送到合适的目的段。

(4) 服务器——它收集所有本地设备的数据来创建一个变电站数据库，并工作在 OSI 模型的应用层。变电站数据库的数据通常被本地的 HMI 图形软件包使用。

(5) 介质——Ethernet 网络通常把①专用的铜双绞线连接（BaseT）或②光缆（10BaseFL 与 100BaseFX）用作介质。对于②中，数据速率指示的 10 和 100 分别代表每秒 10Mbit/100Mbit。

BaseT 介质的优点如下：

1）铜的成本小于光纤。

2）与铜线连接的设备成本小于与光纤所连接的设备成本。

3）拆除铜线时所需的特殊工具和技术较少。

与此相反，BaseF 介质更适合变电站的通信应用，其优点如下：

1）可以将设备从危险和破坏性的地电位升高中隔离出来。

2）不受无线电频率和其他电磁干扰。

3）消除由通信接地回路问题引起的数据错误。

4）允许比铜线连接更长的信号路径。

7.12 SCADA 和通信的关注点

SCADA 系统在微电网和主动配电网管理中的应用完全取决于高效经济的通信架构的成功实施。在微电网中实施 SCADA 系统面临的一个主要挑战就是资产管理，从而与现有 DNO SCADA 系统兼容。它需要在主动式网络管理中逐步改善来克服现有 SCADA 系统固有的局限性和约束，以及对模块化、可重复设计、稳定、安全且低价通信的网络制约。对于 SCADA 系统中基于 IEC 61850 的通信开发和成功实施，可提出以下几点意见：

(1) 通信保护——逻辑节点（LN）被定义为数据对象、数据集对象、描述性属性、报告控制对象、日志控制（Log-control）对象、记录对象以及定义物体边界、状态和行为的一系列采样值的集合。每个数据对象根据其在 IED 内的名称和功能以标准的方式唯一明确地定义。点对点的通信由两个几乎相同的兼容信息来实现，面向通用对象的变电站事件（Generic Object-Oriented Sub-station Event，GOOSE）和通用变电站状态事件（Generic Sub-station Status Event，GSSE），统称为通用变电站事件（Generic Sub-station Event，GSE）。

GSE 信息的标准化确保实现保护、联锁和自动化功能的各个智能电子装置（IED）间的互操作性。虽然 GOOSE 和 GSSE 这两个信息有所不同，但它们可以在网络中共存，并为支持 GSSE 和/或 GOOSE 的多个设备之间提供互操作性。间隔局

域网（BayLAN）网段是用来将网络信息处理保持在一个适当的最低量内，从而最大限度减小网络故障和/或网络攻击带来的影响。

(2) 客户端和服务器之间的互操作性——IEC 61850 规约在 IED 层面上的严格设计要求没有必要限制 IED 的选择和/或间隔局域网的可用功能。串行连接的 LAN 是快速而可靠的，它们从物理上隔离每个 IED，避免 IED 间不必要的流量，将 IED 信息处理量降到最低限度。在间隔 Ethernet LAN 内串行连接 IED 创建混合局域网（LAN），使网络设计者可以在所有新建和服务中的 IED 中选择，包括间隔控制单元（BCU）、间隔监测单元（BMU）、间隔保护单元（BPU）、设备监视器、气象站、控制器、仪表和电池监视系统。因此，这将有利于充分利用已安装的资源，同时也有利于通过 IED 广泛的选择性来促进变电站自动化系统的开发。

在混合间隔 LAN 内的 IED 通信可以使用 IEC 61850，以及其他 Ethernet 规约和/或允许访问相关后台数据的其他直接通信方法。间隔层的互操作性是通过间隔层以太网交换机进行 LAN 分组实现的。在标准范围内允许数据建模以满足电力系统设备管理的应用需求。间隔层的互操作性允许终端用户从供应商那里根据一些性能标准来选择合适的间隔 LAN，例如功能、性能、可靠性、可用性和通信方面等。间隔 LAN 在不考虑功能对等的情况下可能有不同数量的 IED、LN 地址和 GSE 信息。最初的设计关注保护功能和 SCADA 系统的更换，但未来最复杂的很可能是如何将 BCU 通信与其他间隔 IED 合并，从而提供一个集中的数据处理环境。数据的安全性和可靠性也要求 BCU 支持有裕度的、独立的物理以太网连接

(3) 现有控制系统和间隔 LAN 间的互操作性——集中的间隔 LAN 控制授权需要 BCU 与 BMU、BPU 和其他 IED 间进行通信，而不是使用或者还额外需要 IED 直接通过间隔层和站控层以太网交换机与站控层控制单元（SCU）进行通信。虽然 IEC61850 之前是特别为与 IED 参数有关的变电站控制而设计的，当下需要将 IEC61850 的版本转变为新的适应与远方控制中心（RCC）遥控的通信规约。目前，变电站 LAN 流量如此之高以至于有必要进行局域网分段。因此，即使在 RCC 和变电站之间已建立高速的以太网连接，RCC 也可能不足以能够处理与每个 IED 直接通信造成的流程负担。在这种情况下，SCU 或 BCU 必须作为联络通信数据和控制的单个点。

(4) 客户端和服务器之间的互操作性和互换性——IEC 61850 标准对在设计 IED 与间隔 LAN 的结合上是非常有用的。如果终端用户可以满足 IEC 61850 通信的要求，那么所要求的 IEC 61850-IED 接口就可以由销售商开发到客户满意的状态。仅仅只靠这个接口的安装可能还不足以满足其他终端用户对于每种不同情况的不同修改要求。在 IED 服务器内存在的未映射（Unmapped）数据需要在 LN 扩展或增加的过程中对 IEC 61850LAN 公开。通过可用的标准化名称和属性可以大大减少集成新的操作界面、逻辑和控制所需要的工作。然而，在一个间隔 LAN 被另一个含有不同 LN 和 GSE 特性的间隔 LAN 替换的过程中，数据库、逻辑和操作界面的重

新配置是必要的。一些终端用户会选择互换性高的产品，即在一个间隔内任何 IED 可以替换为来自任何制造商的另一个 IED。但因为不同的厂商使用不同的操作原理，可能会影响到协调系统的功能。混合 LAN 能够支持众多不同的 IED 在 IEC 61850 通信接口层的互换性，在新的 IED 或在局域网上的 IED 内创建适当的 LN 和 GSE 接口。

(5) 系统实施——实际变电站 Ethernet LAN 的通信流量将不受 IEC 61850 标准内的规约所限制。未来，变电站 LAN 也可以支持用于以下的网络服务器流量：IED 和 HMI，销售商定制的非标准 IED 规约、Modbus IP 和 DNP IP、电子邮件，传统 SCADA 规约如 IEC 60870，销售商定制的 IED 配置和诊断应用、网络分析器配置和其他诊断的应用程序以及电话通信和相机的应用。在系统实施过程中，必须确保 IED 支持所需的数据要求，并且其性能特点与其他的组件相符合而构成一个成功的网络。未来在 IED 和间隔层之间的灵活的数据映射技术很有可能让 IEC 61850 网络的物理应用变得更为容易。

7.13 结论

微电网的整体控制和管理需要通过先进的智能电子装置（IED）与高速通信通道互连而组成的复杂网络来实现。微电网中央控制器的各项功能，如能量管理、辅助服务管理、计量和保护配合、接地点管理、断路器联动跳闸和快速跳闸，都是通过其能源管理模块（EMM）和保护协调模块（PCM）来执行的。这些模块的整体运行取决于设备间的高速通信和互操作性。因此，带有 SCADA 系统的微电源变电站自动化通信标准的发展将对设计、开发和实现微电网和主动配电网中的 EMM 和 PCM 有重大的意义。标准化的通信规约也将有助于将多个微电网整合形成一个高质量的电力园区。电能质量和微电网及主动配电网的可靠性将在第 8 章中讨论。

第8章　分布式发电并网对电能质量和可靠性的影响

8.1　简介

现代配电系统是由若干设备与众多供电点组成的结构复杂的集合。配电系统与主电网之间的相互作用导致供给用户的电力的特性发生短暂的变化。相对较长周期的停运而言，这些变化通常以非常短的形式出现，或是表现为电压异常和/或频率方面的特征。这些变化决定了供电的质量，而供电可靠性取决于中断和停电的频次。

近些年，由于在商业和工业领域中引进并广泛使用一些敏感的电气设备和电子设备，电能质量和可靠性的问题相当受重视。为使敏感的系统免受电能质量和可靠性问题的不利影响，一些用户在定制电力系统的购置和安装上进行投资，作为对供电方面的调节和补充。用于这类电力调节设备的制造、销售、购置和安装方面的投资促进了优质电力市场的发展。

分布式发电（DG）和以微电网形式出现的分布式能源（DER）的集成，可用于显著改善电能质量和可靠性以适应用户的需要。分布式发电和微电网可提供的具有潜力的服务如下：

（1）热电联产（CHP）系统的应用有助于提高电力系统的整体能效。此外，较之分别购电和为热负荷采购燃料，热能和电能联合的使用为用户提供了一个更经济的选择。

（2）带有可再生或非传统能源的本地发电，像垃圾填埋气、生物质/生物燃料气或者光伏（PV）系统（有无热回收系统）对远离中心发电厂的用户有更高的性价比。

（3）分布式发电只需要在高峰期运行，便可减少当地电力公司的“需求”收费。这种应用被称为调峰，可通过减少高峰需求而降低用户总的能量成本，也有助于增加中心电力系统的容量以服务其他用户。

（4）分布式电网具有和主电网联网运行和独立运行的能力，可在主电网延长停电时间或者发生故障时为优先级的负荷供电。借助于智能控制器，这种从联网模式到独立运行模式的无缝转换，对敏感负荷的扰动最小。

（5）分布式发电机通过其精密的电力电子接口，可以提供电压和频率方面的高质量的优质电能。因此它们适合为特别敏感的负荷供电，用户端不再需要独立的不间断电源（UPS）系统。

因此，发布式发电系统可用于提高现有配电系统中的电能质量和服务可靠性。

8.2 电能质量扰动

发电厂一般发出的是规定电压幅值和频率的交流电（AC）。因此，用户使用的大多数电气设备也设计成工作在一个窄的电压和频率范围内，并且任何超出此范围的偏差都会使设备的性能恶化。当电力波形的幅值和频率超出规定范围时会产生电能质量扰动，对用户造成影响。对电能质量扰动的分析和评估针对的是扰动产生的原因及发生的频次、受电压和频率敏感度影响的负荷类型，以及用户采取的用于保护敏感负荷免受扰动的措施。电能质量扰动的基本类型如下：

（1）暂态。

（2）电压暂降和暂升。

（3）过电压和欠电压。

（4）停电。

（5）谐波畸变。

（6）电压缺口。

（7）闪变。

（8）电气噪声。

8.2.1 暂态

暂态是指次周期电压扰动，表现形式为电压发生非常快速的变化。其特征是频率变化范围可从几十到数百赫兹甚至上千赫兹，而电压偏移范围可从几百伏到上千伏。暂态是由于雷击、静电放电、负荷切换、线路切换、电容器组投切或电感性负荷断开导致的能量注入而引起。扰动可以是冲击性的或振荡性的（衰减或不衰减）。直接雷击产生的暂态最有可能损害电网或用户端的设备，即使是线路附近的雷击也可能引起严重的暂态。由调节功率因数的电容器的投切，或是大容量负荷转换开关引起的暂态可能会严重妨碍系统的正常运行。此外，负荷的电容和线路的电感甚至会形成谐振电路，谐振源会将电压放大。在进线端离开地面安装避雷器或暂态电压抑制器（Transient Voltage Surge Suppressor，TVSS）可以消除暂态，对个别设备安装较经济的专用系统也可消除暂态。然而，更多的敏感设备可能需要额外的保护装置，例如计算机系统，需要安装计算机级的功率调节器和铁磁谐振电路调节器来消除暂态。

8.2.2 电压暂降和暂升

电压暂降和暂升是根据电压幅值方均根的变化而定义的，持续时间为半个周波到几秒。暂降指的是电压下降，而暂升则指电压上升。电压暂升通常是由系统的单

相接地故障引起，导致正常相的电压瞬时上升，突然失去大容量负荷以及大的电容器组的切换等也是引起电压暂升的原因。受电压暂降和暂升影响最大的设备有：工业流程控制器、可编程序控制器（PLC）、可调速驱动器以及机器人系统。电压暂降可能会损坏基于微处理器的数字控制设备的数据，而电压暂升可能会损坏设备电源或使其重置。

8.2.3　过电压和欠电压

持续时间超过 2 分钟的电压突降和突升分别被分类为欠电压和过电压。欠电压产生的原因可能是发生线路或变压器的突然停运，发电损失过大或是线路负荷超出其容量都会导致用户端出现低电压。由于电流密度增加，欠电压可能会引起恒速电动机过热，也可能妨碍电气设备的运行。长时间的欠电压通常可通过改变调压变压器分接开关的档位来校正。

相反，由于电压调节电容器或输电和配电变压器的问题可能产生过电压。当过电压保护装置不能快速响应以完全保护所有下游设备的时候，这些问题会变得严重。过电压问题通常可以通过安装电压调节设备解决，其一般安装在用户所在的关键配电地点，例如入户端、主配电盘或计算机室面板。或者安装 UPS 系统，主电网供电时可以调节敏感负荷的电压，主电网发生故障情况下可作为备用电源。主电网设计的电压变化范围保持在 -10% ~ +10% 之间，同时还提供足够的过电压、欠电压及频率保护系统，以保护其设备免受超出规定范围的异常电压和频率偏差的影响。

8.2.4　停电

停电或电压中断是指在一定时间内电压完全消失。停电可能是短时的（不到 2 分钟），或者是长时间的。停电通常是由隔离装置（断路器或线路的重合器）动作引起的，或者由线路的保护动作引起。在输电或配电馈线上出现故障的情况下，断路器或重合器会立即断开以清除故障，连接在故障馈线上的用户会遭遇一次或多次的电压中断，这取决于故障的类型和电力公司的重合闸情况。短暂的故障通常在一、两次重合闸后便可消除并恢复正常供电，而对于永久性故障，断路器会在多次尝试重合闸后被闭锁，这将导致发生永久性故障的线路上的长时间停电。在故障和连续的合闸尝试过程中，永久性故障线路上的用户会持续停电，与永久性故障线路并联的线路也将会出现电压突降。

对系统而言，可以安装 UPS 系统、存储机械能或者给设备配置多路馈线来减缓停电，其中 UPS 系统是带有电池储能以及功率调节装置的，机械能则存储在高速飞轮中。然而防止瞬时中断需要有源静态转换开关（State Source Transfer Switch，SSTS）。为防止持续停电（超出 UPS 或电池系统的储能能力），可以通过柴油发电机组或低排放分布式发电机现场发电来供应，其中低排放分布式发电机是基于非传统/可再生技术的。

8.2.5 谐波畸变

当电压或者电流的波形偏离了标准正弦波时就会产生谐波畸变。谐波畸变意味着在潮流中除了标准工频分量之外，还存在着更高频率的分量。高频分量会降低设备性能，甚至可能损坏设备。由谐波引起的问题为配电变压器过热、中断电子设备的正常工作和功率因数校正装置的系统共振。计算机、照明镇流器、复印机和变频驱动器都可能是潜在的谐波源。谐波干扰可以用设备来避免或控制，例如12-脉冲的输入变压器配置、阻抗电抗器或者有源滤波器及无源滤波器等。

8.2.6 电压缺口

电气控制系统中使用晶闸管整流器（Silicon-controlled Rectifiers，SCR）时，线电压畸变会以“缺口”的形式出现在波形中。典型的电压缺口会出现在SCR整流中，也会出现在单相SCR关断同时另一相打开的波形中。在这很短的时间内，两相间发生瞬态短路，导致了电流上升及电压下降。在电压波形中，电压下降就是一个缺痕。缺口最严重并最具破坏的形式是其过零（触及零电压轴线）。像直流电动机转速控制和感应加热设备，这类的设备都频繁使用SCR控制方案并频繁遭受缺口影响。典型的线电压缺口的电压波形如图8-1所示。

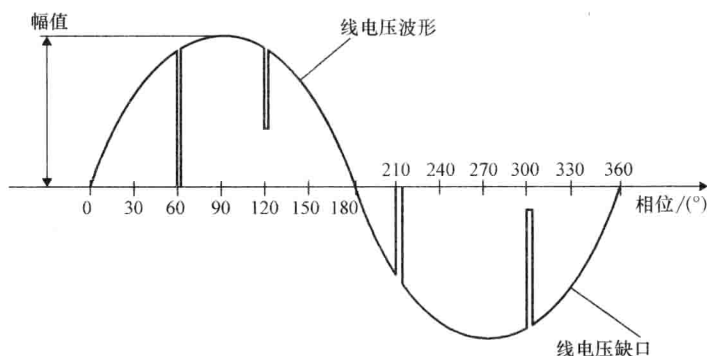


图8-1 电压缺口

不同电气设备的正常功能是基于对电压波形的过零检测。某些设备为了避免浪涌电流或者冲击电流，需要在过零时触发；而另一些设备为了内部时钟信号而使用零交点，例如数字时钟。对这类设备，接近零电压轴线的缺口可能以零交点的形式呈现，由此引起设备工作不正常。作为产生缺口的连接到同一电压源的敏感设备，可以通过安装3%阻抗电抗器加以保护，阻抗电抗器可消除多零点交会并减小对相邻设备的干扰。

8.2.7 闪变

闪变定义为频率低于25Hz时的电压波形调幅，由人眼观察到的标准灯泡发出

的光的变化来确定。电压闪变通常是由电焊机或电弧炉在电力系统上形成的电弧所引起的。安装滤波器、静止VAR系统或配电静止补偿器即可消除闪变。

8.2.8 电气噪声

电气噪声定义为电磁干扰（EMI）的一种形式。当线路的标准信号上叠加了高频低电压信号时，就会产生电磁干扰。电压高达20V时，这些信号的频率变化范围从几千赫兹到兆赫兹。EMI对通信过程产生不利影响，因此被称为噪声。自然干扰源和人为干扰源的变化产生了噪声，干扰源为照明、静电和太阳辐射，还有附近存在的工频输电线路、汽车点火、电力电子设备的高频开关以及荧光灯等。受噪声严重影响的设备为计算机、工业流程控制设备、电子测试设备、生物医学仪器、通信媒介以及气候控制系统。在设备层安装射频线路滤波器、电容器或电感器就可降低噪声的影响。

电能质量扰动对设备运行的影响不仅取决于当地用电设备的类型，还取决于其全年发生的频次。即使典型的电压突降或中断持续的时间非常短暂，对用户影响的不同在很大程度上取决于设备的电压或频率敏感度。大多数敏感用户可能会受到若干小时的严重影响。研究表明，几乎一半的扰动是电压突降/突升，而另一个最常见的问题是谐波畸变，接下来是设备的线路/接地问题。然而，应注意的是，大多的电能质量问题并不是因为电力系统方面的原因引起，而是由于用户自己的用电设备或是相邻用户的用电引起。

8.3 电能质量敏感的用户

在商业和工业领域中，随着对电压和频率敏感的精密电力电子器件、数据采集和监控（SCADA）系统和计算机流程控制系统的出现，电能质量和可靠性的问题作为判断供电质量的一个主要标准已相当受重视。为使敏感的系统免受电能质量和可靠性问题的不利影响，一些用户在定制电力系统的购置和安装上进行投资，以作为供电方面的调节和补充。这些投资和对UPS系统、电池、飞轮储能系统及柴油发电机组这类电力调节设备的制造、销售、采购和安装问题的处理促进了优质电力市场的发展。对使用如微燃机、太阳能和风力、燃料电池以提高电能质量和可靠性的环境友好型分布式发电，以微电网的形式与主电网联网，或独立运行的可能性也正在细致的研究之中。

在8.2节讨论过，当主电网提供的电压波形与等幅值、等频率的标准正弦波形不一致时，将会产生电能质量扰动。电能质量扰动的极端表现是导致用户终端的持续停电或电压完全消失，这些停电给用户造成的经济影响随用户的类型或特定用户所使用设备的敏感度有很大变化。不允许长时间停电的用户通常会在现场安装备用发电机组，作为供电中断时优先级负荷的备用电源。反之，对于那些因为任何的供

电中断或电能质量波动都会遭受严重经济损失的用户，通常会安装 UPS 系统及其相关电力和调节设备以消除冲击电压、电压突降、谐波和噪声的影响。

需要真正优质电力系统的用户如下：

(1) 关键任务计算机系统——银行、储蓄机构、金融公司、股票市场、投资机构、保险公司、计算机处理公司、航空/铁路订票系统和需要保护其计算机、外围设备及计算机冷却系统的企业总部。

(2) 通信设施——电视/无线电台、电话公司、互联网服务提供商、移动电话站、中继站、军事设施和卫星通信系统，它们都必须保护自己的计算机、外围设备、天线、广播设备以及交换机。

(3) 医疗保健设施——如医院和养老院中的医疗保健设施，需要维持危重病人生命的支持系统、医疗设备，并确保关键性供暖、空调环境得到适当的维护。

(4) 大型照片冲扩实验室——这些实验室必须保护其计算机和冲扩设备。

(5) 连续流程生产系统——对于造纸、化工、石油、橡胶、塑料、石材、陶土、玻璃以及初级金属行业中的这类制造系统，任何供电中断都将导致生产损失。

(6) 制造及基本服务——这些服务和所有其他的制造业加上公用事业设备和交通设施，如铁路和城市轨道交通、供水和废水处理、煤气公司和管道等。

8.4 现有电能质量改善的技术

电能质量可以在电力系统中的任意一点和任意程度上控制或改善，由主电网配置设备为用户层面上个人装置采取大范围的改善措施。由于对电能质量敏感的用户只能对主电网运行或其设备设计进行间接且有限的控制，所以他们只能在仪表的自己一侧采取连接功率调节设备的措施，来保护其负荷免受任何电能质量扰动的不良影响。在主电网供电时，这些功率调节设备帮助用户将其负荷和系统与电能质量的变化隔离开，或者减少用户设备产生的电能质量扰动。用户可以选择保护其进户电力线上或敏感子电路上的全部负荷，这些负荷带有独立电路保护，或者是选择通过独立设备保护装置来保护独立的运行及控制。

依照优先级负荷和功率调节设备的大小及类型来决定保护级别，分类如下：

(1) 小型设备（小于 3kV·A），包括低电压、单相电能质量保护设备，在使用点应用中保护单个设备如个人计算机（PC），或对大型设备进行逻辑控制。此类型的设备包括以下几种：

1）UPS。

2）单相 TVSS（暂态电压抑制器）。

3）单相功率调节器、隔离变压器和电压调节器。

(2) 中型设备（小于 100kV·A）用于在工厂内保护低压配电系统（240 ~ 600V）。这种设备通常位于进户线面板或者对馈线或分支线供电的电路中。这种类

型的设备包括以下几种：

1）单相 UPS（3～18kV·A）和三相 UPS（最大 100kV·A）。

2）除了带收入需求表装式单元以外的三相 TVSS。

3）三相功率调节器：电压线路调节器、隔离变压器、功率分配单元、电压调节器、电动发电机以及动态、静态谐波滤波器。

（3）大型设备（大于 100kV·A） 设计用于设备的进户线处。这种规模的设备可以安装在户外基座安装机箱或用户自有的变电站中。大型设备包括以下几种：

1）储能系统，包括电池储能和机械储能系统。机械储能系统如带有电化学电容器的飞轮系统。

2）大型 UPS。

3）低压静态转换开关（低于 600V）。

4）中压静态转换开关（低于 35kV）和用户电力产品，如静态串联补偿/动态电压恢复器（DVR）、静态分流补偿器和静态断路器。

8.4.1 备用电源技术

备用电源可以改善对用户服务的可靠性和供电质量。备用电源可以是另一主网馈线、备用发电机或是 DG 系统。电能质量和可靠性的改善取决于与从电源连接的技术。此连接转换技术的类型如下：

（1）手动转换开关——这需要足够的人员手动地将电源从一条馈电线路转换到另一条馈电线路。手动转换需要几分钟，避免了长时间停电。

（2）自动转换开关——当检测到主馈电线路中发生故障时，就会自动切换到备用馈电线路。即使在从馈电未受影响的情况下，一次成功的转换也会引起短暂的电力中断。如果从馈电是备用发电机，那么根据设备起动能力的不同，可能需要耗费更多的时间来完成转换。例如，柴油发电机起动需要 10s 左右的时间。在分布式发电系统已经运行的情况下，对负荷的需求按正确整定值调度电力需要几个周波或几秒钟。这不会引起长期停电，但不能保护敏感用户的电压突降和瞬时停电。

（3）有源静态转换开关——这是需要约 4ms 的超高速开关。它采用固态开关完成从一个电源到另一个电源的无缝切换，但是此快速切换需要从电源准备随时带负荷。因此，对于没有任何 UPS 备用的有源静态转换开关的应用来说，备用发电机是没有用的。这种情况下，主电网的备用馈电会提供所有配电层面的主电网故障保护，但无法在持续的输电系统故障情况下保护用户。

8.4.2 功率调节技术

本节将讨论一些功率调节设备。这些设备用于在用户现场改善电能质量。

（1）暂态电压抑制器（TVSS）——TVSS 用于防止雷击和其他电压冲击。它们通常是金属氧化物变阻器（MOV），可作为小的插件式浪涌抑制器用于个人计算

机、小型电子设备以及大型设备，保护整个设备或关键电路。

(2) 无功补偿 (VAR)——由于系统没有无功功率补偿会引起电网的不平衡，例如电压的突降和突升，这将引起电流过大和用户设备过热导致发生损坏。电压波动的影响也往往会降低设备的预期寿命。因此，下面的无功功率补偿技术可用于恢复和保持电压稳定：

1）同步调相机。

2）配置在大型感性负荷附近的固定电容器组。

3）晶闸管开关电容器（TSC）。

4）晶闸管开关电抗器（TCR）。

5）静止无功补偿装置（SVC）。

6）静止同步补偿装置（STATCOM）。

7）有源无功补偿装置。

(3) 动态电压恢复装置 (Dynamic Voltage Restorer, DVR)——DVR 为系统提供了足够的缓冲以度过暂时的扰动，如下降、突降及突升的电压暂态。DVR 串联在电网和受保护的负荷之间，在输电或配电系统发生故障引起电压暂态时可以稳定用户系统的电压。DVR 可以设计用于满足任何电压和负荷的要求，但最适合于工业和大型商业用户的中、高电压情况下的应用。DVR 中的电容器组可提供高达 300 ~ 500ms 的电压突降的储能。

(4) 隔离变压器——从统计上看屏蔽隔离变压器用于屏蔽对电磁干扰（EMI）敏感的负荷。这些负荷包括用于医疗和外科手术室或者是非常精确的流程控制的敏感的电子设备及计算机设备。隔离变压器通过非直接接触来保护这些负荷，初始接地故障时电路不中断。因此，优先安装隔离变压器的负荷不希望发生突然中断，同时严禁自动中断。

(5) 同步电动机-发电机组——同步电动机-发电机技术被用作一个非常有效的“线路调节器”，可稳定电压并抑制噪声。该同步电动机-发电机组由连接到一台发电机/同步发电机上的直流或交流电动机组成，在电源故障期间为优先级的负荷供电。它不仅抑制共模噪声，而且还可以抑制由于轴或传送带连接进入到输出中的任何线对线（Line-to-line）噪声。旋转式 UPS 系统使用同步电动机-发电机组的转动惯量穿越短时电源中断。在这个系统中，发电机提供了真正的电源隔离，除了由发电机绕组特性产生的一些轻微谐波之外，不会产生任何异常通过 UPS。

(6) 不间断电源 (UPS)——在双变换或优质 UPS 系统中，输入的交流整流成直流供给 UPS 内部的直流母线，输出逆变器将直流电转换成规定标准的工频交流对优先级的负荷供电。在正常运行（电网电源可用）时，连接在直流母线上的电池浮动充电，而当电网停电时，电池给直流母线供电，支持逆变器及优先级的负荷。双变换 UPS 的配置如图 8-2 所示。

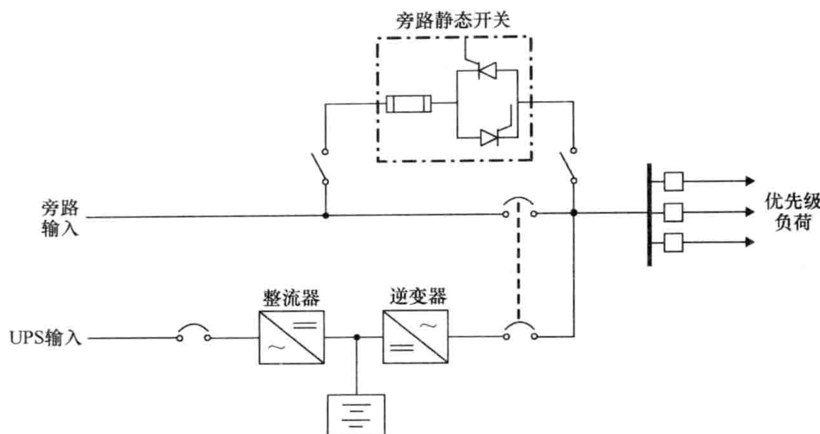


图8-2 双变换UPS系统的方案

该UPS系统包括了以下子系统：

1）**系统控制**——系统控制逻辑自动管理主母线的运行，并监测UPS模块的性能，通过微处理器及专用固件提供与外部设备的交互显示及端口通信。

2）**整流器/充电器**——整流器/充电器将交流电转换成直流给电池充电，并给低纹波直流电源逆变器提供直流输入，以防在电源中出现谐波电流畸变。

3）**逆变器**——逆变器将直流电转换成所需的精确的交流电，给敏感的优先级负荷供电。它通过易于进行的滤波将直流电转换成脉冲宽度调制（Pulse-Width-Modulated，PWM）的波形，产生一个最大限度减少由典型切换电源和其他非线性负荷组件引起的谐波电压畸变的纯正弦波输出。

4）**静态旁路开关**——当系统上严重过负荷或UPS内有故障时，固态旁路开关能快速地将负荷从由电源逆变器供电转换到由旁路交流电源供电。静态旁路开关动作时不需要中断对负荷的供电。该系统需要包括冗余电路，用于检测并隔离静态旁路开关内发生短路的SCR（晶闸管整流器）。

5）**熔断器**——熔断器与静态旁路电路串联安装，在任何灾难性输出情况下提供可靠的过载保护。静态开关SCR的额定容量足以承受令熔断器动作的电流。

6）**旁路电路**——旁路电路由电动机操作的断路器和与之并联的固态开关及相关的同步控制电路组成。同步控制电路可将负荷从逆变器转换到旁路电源，或者从旁路电源转换回逆变器。

7）**电池储能系统**——当交流电源电压超出规定范围时，电池储能系统替代其用作向逆变器供电的直流电源。电池为逆变器供电到主电网供电恢复或备用电源可用，如果交流电源未恢复或备用电源无法使用，电池可为负荷的有序断开提供足够的电力。

此UPS系统的主要优点如下：

1）优先级的负荷与输入的交流电源完全隔离。

2）优先级的负荷由始终通过内部直流母线馈电的逆变器供电。因此，在输入电源出现故障的情况下，由于逆变器按 DC 输入工作，所以输出电压不存在过渡性突降。

3）即使交流输入电压和频率发生波动，双变换 UPS 也并不会在意，因为整流器只将直流电供给直流总线。当输入电压低于标称值的 15% 时，UPS 可以工作，甚至可以继续给电池充电。当电压突降低于标称值的 20% 时，UPS 可以继续工作，无需电池放电。同样，如果输入频率在规定范围内外波动，整流器将继续产生直流电，同时输出逆变器在不使用电池的情况下继续产生 50Hz 的电力。

4）输出逆变器通常包含一台产生隔离的电源中性点的隔离变压器。这使 UPS 能被电气隔离，对负荷进行共模噪声保护。

5）双向变换 UPS 本质上是双输入，即具有整流器和旁路电路的独立输入。

6）当输入线路上发生故障时，UPS 转为电池供电，但 UPS 整流器不允许有从直流母线向上游的潮流。

7）这是一个很好理解的设计，其性能经过长期验证。尽管电池储能是 UPS 中最常见的形式，但其他的储能形式正被使用和/或开发用于商业用途。这些新出现的系统包括飞轮、超级电容器、超导电磁储能装置等。

8.5 分布式发电并网的影响

可以肯定的是，通过分布式发电的使用及其并网可以改善优质电力市场的可靠性和电能质量。分布式发电通过有源配电网络以微电网形式的集成对可靠性和电能质量的改善有重大影响。电能质量和可靠性改善的主要内容有以下要求：

（1）快速响应——负荷需要储能系统快速响应以防止瞬间电压波动。

（2）清洁的电力——存储的电能应转换为清洁的电力。

（3）同步——平滑的控制应是并行及同步的。

（4）软转换——备用电源应具有电力无缝转换的能力。

（5）隔离——集成的分布式发电系统，即微电网应有足够的效率，可以在任何突发事件情况下与主电网快速隔离。

（6）足够的能量存储——存储的能量应足够应对任何停电，直至主电源或备用电源恢复。

（7）对优先级负荷供电——微电网应能够为系统的优先级负荷提供清洁的电力。

（8）调度能力——微电网应能够为不同的本地负荷供电。

（9）效率——微电网应高效运行。

（10）排放——微电网应降低分布式发电系统的排放，最大限度减少对环境的影响。

分布式发电系统集成方案的一些例子如下：

1）简单的备用发电方案。

2）带有电能质量支持的从分布式发电系统（Secondary DG System）。

3）对优先级负荷带有电能质量支持的主分布式发电系统（Primary DG System）。

4）对优先级负荷有电能质量支持的软联网的分布式发电系统。

5）电能质量环境中有间歇性太阳能光伏的分布式发电系统。

6）电能质量环境中有间歇性风力发电机的分布式发电系统。

7）采用双回路直流母线的超高可靠性方案。

8.5.1 简单的备用发电方案

如图 8-3 所示，长期停电时备用发电机能保证给负荷供电。备用发电机通过自动转换开关（Automatic Transfer Switch，ATS）连接到负荷上。逻辑控制器自动检测主电网的停电，通过 ATS 切换负荷并起动发电机。

典型的柴油发电机组给负荷供电需要 10s 时间。在发电机不过载的情况下，对于优先级的负荷，由柴油发电机供电的负荷可优先保持供电的连续性。柴油发电机可保护负荷免受长时间停电，但不能使负荷免受所有的短时电压扰动。因此，对于短时电能质量敏感的用户，这个方案是无效的。使用未得到控制的柴油发电机受到其污染排放和切换控制的制约。然而，带有精密开关设备的环境友好型备用燃料发电机可以在这个方案中广泛使用。

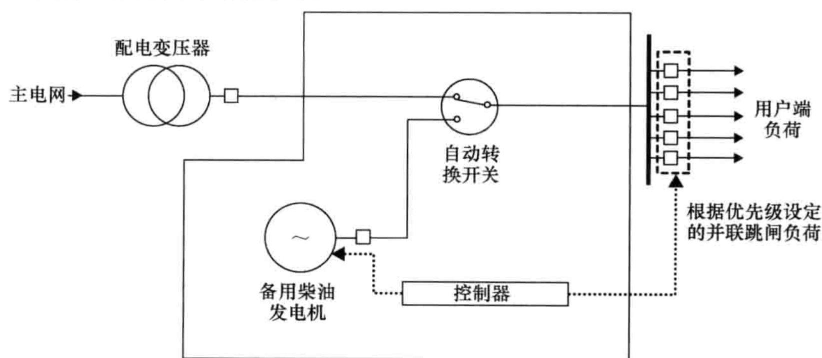


图 8-3 简单的备用发电方案

8.5.2 带有电能质量支持的从分布式发电系统

典型的带有电能质量支持的从分布式发电系统（Secondary DG System）示于图 8-4，该系统采用储能方式防止长时间停电。它通过先进的控制系统为负荷提供短时及瞬间电压波动保护。现场储能用来穿越电网故障，直到发电机起动给负荷供电。精确的静态切换及控制防止负荷检测到主电源、备用电源和从分布式发电电源

中的任何逆转换。

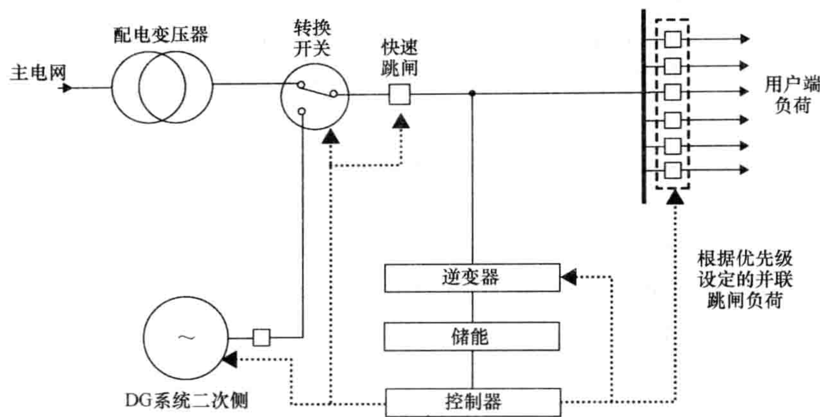


图 8-4 带有电能质量支持的从分布式发电系统

此方案配置通常用于对电能质量敏感的使用带有电池支持及备用发电机的 UPS 负荷。高敏感度的应用需要系统冗余。该方案使用具有良好可靠性和电能质量的环境友好型发电机，因此选择该方案可以是出于对经济的考虑而不是考虑到在紧急情况下使用。环境友好型排放控制、燃气发电技术的双燃料变换，可使该系统用于在主电网和微电网之间进行适当的高峰负荷调节。

8.5.3 对优先级负荷有电能质量支持的主分布式发电系统

对优先级负荷有电能质量支持的主分布式发电系统（Primary DG System）如图 8-5 所示，该方案是热电联产（CHP）系统的备选配置。

CHP 系统与主电网联网运行以提供低成本的电能和热能。为了在主电网停电期间 CHP 系统能成功地独立运行，发电机的类型、开关设备、控制系统等需要专门设计，以保护优先级的负荷。

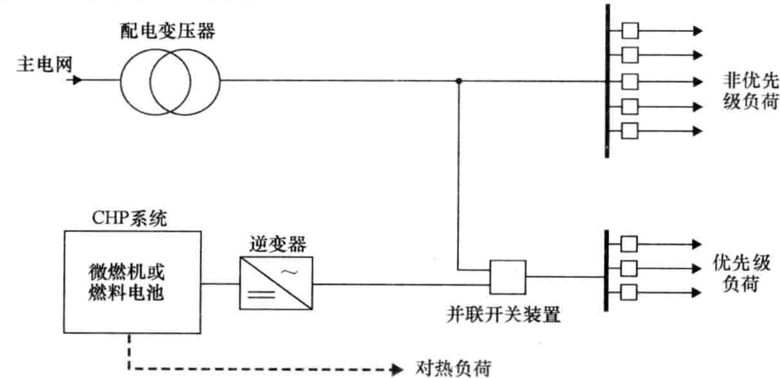


图 8-5 对优先级负荷带有电能质量支持的从分布式发电系统

8.5.4 对优先级负荷有电能质量支持的软联网的分布式发电系统

如图 8-6 所示，此方案类似于前面提到的那一个。它具有孤网运行的能力，并带有抗孤岛保护。该系统还能提供备用发电机的可靠性。此外，它可作为一个外带有 UPS 和储能介质的完整优质的电力系统运行。

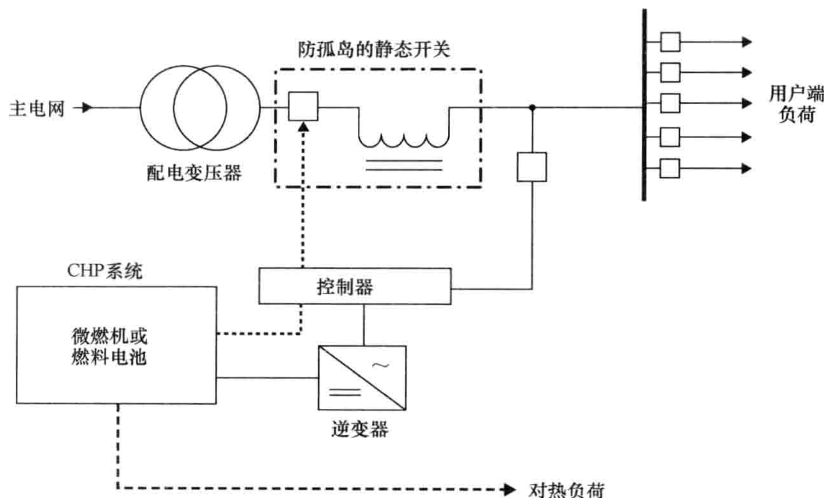


图 8-6　带高优先级负荷电能质量支持的软并网分布式发电系统

8.5.5 电能质量环境中有间歇性太阳能光伏的分布式发电系统

图 8-7 示出了间歇性光伏阵列可再生分布式发电系统的连接配置。

此配置按现场电能质量要求提供足够的支持作为对电能消费的补充。

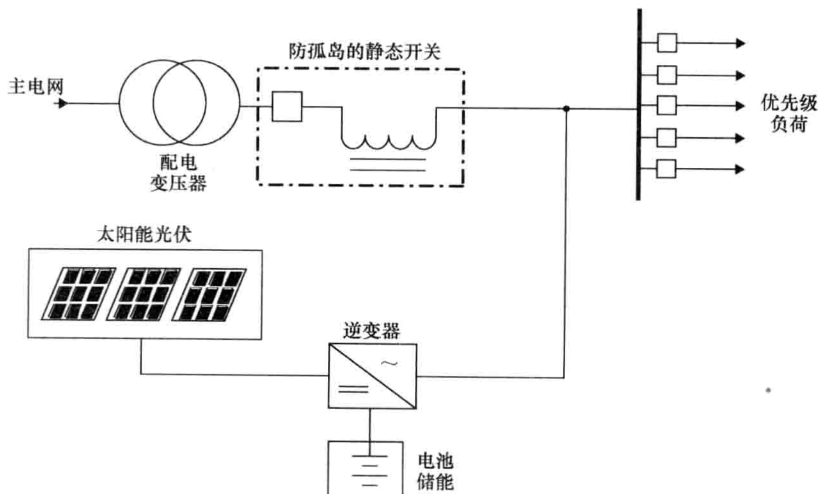


图 8-7　电能质量环境中有间歇太阳能光伏的分布式发电系统

8.5.6 电能质量环境中有间歇性风力发电机的分布式发电系统

图 8-8 示出了间歇性风力发电机可再生分布式发电系统的连接配置。此配置按现场电能质量要求提供足够的支持作为对电能消费的补充。

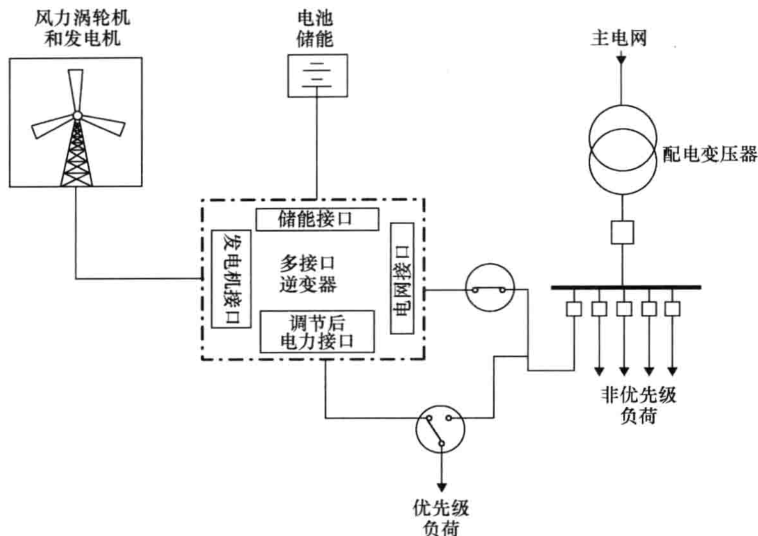


图 8-8 电能质量环境中有间歇风力发电机的分布式发电系统

8.5.7 采用双回直流母线的超高可靠性方案

图 8-9 示出了典型的采用双回直流母线的超高可靠性方案。该系统供给需要极高可靠性的用户使用并能与主电网解列独立运行。它集成了现场发电机、UPS、飞轮储能设备等，通过有足够多冗余的双母线连接来保持高质量供电的连续性。

此方案中，在正常运行情况下分布式发电系统作为主要电源，主电网作为备用电源未与任何电网相连。飞轮储能设备保护分布式发电系统免遭停电以及负荷阶跃变化（Step Load Change)。分布式发电系统连续运行产生的余热可供 HVAC（暖通空调）使用。

此方案具有以下优点：

1）电源电压发生故障不消耗其他电源的电力。

2）因为清除故障胜过 UPS，所以优先级负荷的故障会与 UPS 电动机-发电机隔离。

3）控制系统故障不会引起其他系统故障。

4）多台发电机的运行相互独立。

5）不会有反向潮流。

6）同步或级联故障是远方的。

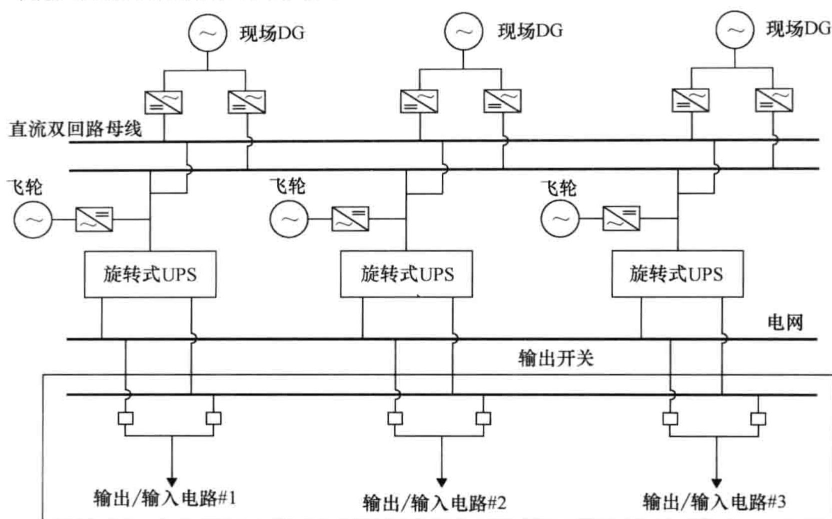


图 8-9　采用双回路直流母线的超高可靠性方案

8.6　分布式发电并网中的优质电力问题

带有 UPS 的分布式发电系统与其他优质电力设备的集成需要解决以下问题，确保系统正常运行：

1）现场存储容量应足以维持到发电机起动供电。柴油发电机可以在 10s 内起动，而 CHP 微燃机的起动时间可能长达 90s。因此，维持时间不到 30s 的飞轮可用作柴油发电机的备用电源，而不能用于微燃机。

2）分布式发电系统对带有电机起动或其他阶跃负荷的优先级负荷提供的支持应该足以避免电压控制的任何损失。带有燃料电池、微燃机的分布式发电系统不像发电机那样能够处理阶跃负荷变化。

3）分布式发电系统与主电网联网运行要有必需的互连保护，用于在故障清除及重合闸技术中的主动断开连接/再连接、电压/电流调节等。

4）带有 UPS 和/或备用发电机的分布式发电系统应该注意对恒温 HVAC 控制的同步问题，其中可能会产生许多不利的负荷脉冲。

5）带有静态滤波器 UPS 的分布式发电系统应该注意在轻负荷条件下的电容过剩，这可能导致由功率因数不匹配产生的电压控制损失。它应具备处理高品质电力负荷的能力。

6）为了给敏感的负荷提供可靠性极高的电能，分布式发电系统应通过使用双母线、ATS 等保证有足够的冗余。

7）分布式发电系统之间需要用适宜的防火墙相互隔离开，以在任何火灾危险的情况下保护系统负荷。

8）分布式发电系统在待机模式下需要有双起动装置、特殊的燃料过滤器等。

9）分布式发电系统作为主电源供电需要执行电能质量和可靠性所有方面的要求。

8.7 结论

较之几乎不发生的停电而言，为确保敏感性负荷免受微小和高发的供电扰动影响，用户更愿意在电能质量和可靠性方面投资。除了集中的以及孤立的 UPS 系统外，一些像功率因数校正控制器、谐波滤波器和隔离变压器等优质电力设备都得以使用。备用柴油发电机、基于 CHP 的微燃机被用于前面所提到的不同的方案中。带热负荷的微燃机既可作为与主电网联网的主发电机进行发电，也可作为用于应急保护的带有抗孤岛保护的独立备用电源。通常主电网的服务会忽略用户对改善供电可靠性和电能质量的重复要求，根据此要求用户需安装电源监控设备以获取在线数据进行电能质量问题的识别和诊断，由主电网通过其服务去解决。可以肯定，分布式发电系统的并网能卓有成效地支持用户对供电质量和可靠性的要求。分布式发电系统的并网中，在通过减少备用柴油发电机组投资来降低投资成本方面，调峰 CHP 的应用发挥了重要作用。

因为用户不愿投资 UPS，所以在分布式发电系统并网中，CHP 的应用对解决较不敏感负荷的电能质量问题是非常有用的。而电能质量特别敏感的用户对获得这种分布式发电系统集成的益处没有兴趣，因为他们有专用的 UPS 系统。

为了解决分布式发电系统并网的电能质量和可靠性问题，提出了一个可能的普遍解决方案，需要考虑以下问题：

1）由于不同电子设备的系统不兼容，备用发电机和分布式发电系统二者本身都可能会产生电能质量问题。因此，为了解决不兼容的问题，对未来分布式发电系统所有的安装和调试都需要正确的设计。

2）互连规则，这是为了阻止分布式发电系统在主电网停电期间提供备用电源，需要从技术和经济的角度重新审视。

3）要鼓励自有分布式发电系统的用户在集成的系统出现紧急需求情况下供电。

4）应允许有分布式发电系统的用户参与开放的零售市场。

5）可供选择的技术方法，如双燃料发动机，在完全紧急状态下允许针对经济调度进行清洁运行，以及用于分布式发电、UPS 的集成电力电子模块等，需要进行

融合来提高市场增长下的发展机遇。

6）分布式发电系统的并网需要执行具备所有必要的系统保护功能的高性价比保护程序包。

7）已并网的运行在优质电力环境中的分布式发电系统需制定为今后有效履行的最佳实践指南。

第 9 章的内容是关于微电网经济方面的影响。在宣传作为分布式发电经济可行性的技术优势之前，应评估经济方面的影响，并且在它们的市场盈利中，微电网方案最终将发挥最重要的作用。

第9章 微电网经济性

9.1 简介

微电网的市场接受度和生存能力与多个经济问题息息相关。尽管现行备用容量收费与净电量计价政策、微电网在公用事业中的地位，以及小型发电商为邻近客户服务能力的监管事项都与分布式能源很类似，但还是不足以使微电网普及。因此，为了使微电网在公用事业中占据一席之地，有必要在微电网应用示范项目中对相关经济问题进行评估和解决，并且精心设计与这些经济问题相关的监管事项，这样微电网才能有效地参与到电力及多个辅助行业的开放市场中。同时，还须修改构成障碍的多项监管条例，使微电网具有市场生存能力。

集中式发电在关于分布式小规模发电满足就近负荷供电的可持续性方面受到质疑。由于环境问题、可供使用的站点用地及化石燃料的减少，集中式发电站的新建、扩建与未来配套输电设施的建设均不具有经济可行性。此外，电力市场重组可能带来电力商品价格的波动以及投资审批流程的不稳定，导致供电可靠性出现不可预知的情况。尽管微电网不会与现有的集中式电力系统形成竞争，但是会与激进环境下形成的供电不稳定系统构成竞争。在微电网系统中如有可能选择热电联产方式，将提高能源的综合利用效率，并为拥有极敏感设备的终端用户提供高可靠性的电力供应。总之，微电网的经济性决定了微电网的配置和运行。

9.2 微电网经济性的主要问题

微电网经济性的主要问题分为以下几类：

（1）优化技术投资——微电网的运营需要应用最优投资和现有技术的基础经济学原理。大电网规模的电力系统运营积累的知识也需要优化应用于配电级电网，即微电网。微电网的运营应当合理采用已有的可靠工具。

（2）利用独特之处——合理利用微电网经济性的一些独特方面。与传统的配网系统不同，微电网能够按照客户需求向终端用户提供多种可靠性水平的供电。集中式发电系统与微电网在经济性运行限制方面也可能不尽相同，例如：噪声水平的限制对集中式电力供应商而言微不足道，而微电网则不然。

（3）与配电系统的关系——对微电网经济性而言，微电网与配电系统的关系是一个很重要的方面。微电网需要在用户和主电网成功连接的系统中获取实时电价

信号，这有助于实现微电网与主电网资源的优化利用。值得注意的是，微电网在主电网的辅助服务市场中，其电压支撑及损耗调节的能力有限。然而，微电网可以为终端用户提供电压支撑及其他出色的就地辅助服务。通过市场参与的方式就地提供电压支撑及其他辅助服务可以显著提升微电网的经济性。

9.3 微电网和传统电力系统的经济性比较

微电网通常是由一群关注减少环境影响的客户设计并投入运行。然而，微电网的主要目标是尽量减少参与用户的总用热和用电费用。微电网可以优化利用废弃的热能从而能以更低的成本提供能源供应。此外，与传统电力系统不同，微电网不会产生任何与输配电损耗、客户服务、电力拥堵及其他关联的费用。与传统电力系统相比，微电网有多方面的优势可以降低能源成本。用户侧发电方式与传统的发电方式，尤其是与往复式发动机发电相比，更具有竞争性。但是，微电网带来的环境影响及并网费用有时限制了它的适用性。新兴的分布式能源（DER）技术在生产低成本清洁能源方面前景广阔。值得一提的是，最新的碳捕获及存储（Carbon Capture and Storage，CCS）技术已经在现有发电机组上投入使用并发出清洁的电能，并提高能源利用效率近50%。

除了潜在的附带效益外，DER技术还可以挑战集中式发电的经济性。但是相对而言，传统的发电系统风险更低，与终端用户的交易成本也更低。微电网经济性最主要的障碍是安装和调试产生的隐性超支和不明显的费用。高额的微电网DER安装费属于政府补贴范畴，尤其是安装高效的储能系统支持微电网孤岛运行。但是，该安装成本还是要反映在微电网的经济性评估中。同时还须考虑孤岛运行给客户带来更多的利益及维持主电网系统高可靠性都会产生额外的费用。可以运用简单的工程经济学原理选择适合的DER技术及其在微电网的应用方式。

与主电网相比，微电网的经济性在以下几个方面较为相似：①经济调度规则；②根据设备特性以尽可能低的成本整合资源使成本最小化；③不同时段的购售电交易；④多元技术资源的优化组合满足系统不同的工作周期；⑤高投入低可变成本的发电技术满足基本负荷需求的适应性；⑥低投入高可变成本的发电技术满足峰值负荷需求的适合性。

与主电网相比，微电网的经济性主要有以下不同：

（1）热电供应联合优化。

（2）供需联合优化。

9.3.1 热电供应联合优化

热电联产（CHP）系统是微电网经济中尚待开发的领域。在一些国家，CHP系统只是部分用于发电。然而，CHP系统的主要目标是利用余热为用户供暖，并

通过热电联合优化方式发电。对于集中式发电系统的经济性而言，决不会将热能的利用作为主要目标。再次考虑使用 CHP 系统的原因在于它可以大幅降低碳排放并提高总体发电效率。通过 CHP 系统的使用，总体发电效率可以由传统火电技术的 33% 或联合循环燃气轮机（Combined Cycle Gas Turbine，CCGT）的 50% 提高到 80% 以上。CHP 是微电网经济性的核心，通过尽可能地减少发电机组和负荷间的热能传输损耗实现能源利用效率的最大化。因此，基于 CHP 的发电机组应位于热负荷的场所附近。CHP 在微电网中的主要应用包括：①空间加热，家庭用水加热与灭菌；②工业或制造业生产过程供热；③空间制冷，吸收式制冷。开发 CHP 的技术可行性使客户能够自发地利用 CHP 发电。与分别向不同的能源供应商购入电能、供热、冷却服务相比，这对于终端用户而言较为经济。此外，CHP 也是多种用户联合共同安装与投运基于 CHP 微电网的主要动机。然而，为了促进更多的用户形成微电网，还需要广泛开展关于 CHP 经济性研究以检验热电联供的总体效益。

9.3.2 供需联合优化

供需联合优化是微电网经济性第二个需要优先考虑的事项。传统的电力经济性需要延伸到微电网中。在主电网规模经济性中，负荷控制是在分析和规划阶段通过需求侧管理、减载、可中断的收费/合同等方式来解决。对于微电网而言，衡量此联合优化最重要的判断标准是任意时间点的自发电边际成本。在发电经济中不考虑投资成本回收、交叉补贴、非精确计量与计费。在主电网规模经济中，费用和环境方面的因素也没有很好地体现出来。对微电网而言供需优化相对更容易实现，因为生产者与消费者属同一决策人。微电网应该掌握每一时间点的发电边际成本和能源效率投资的等量成本，以及能够随时决定缩减交易成本，这就成为实施负荷控制的新范例。

9.4 微电网出现的经济问题

微电网的某些经济问题具有其独有特征，有别于传统的主电网规模经济。微电网可以向多个终端用户提供不同可靠性水平的供电。与集中式发电不同，微电网需要在一些约束条件下运行，如减少发电机产生的噪声。传统电力系统的设计和运行通常是按照统一的电能质量和可靠性为用户输送电能，而不考虑终端用户的不同需求。微电网则可以控制终端用户侧节点的电能质量和可靠性，从而满足用户不同可靠性水平的供电需求。因此，对用电质量和供电可靠性要求低的低端用户，可以通过低价购电来降低他们的能源费用。同理，对用电质量和供电可靠性要求高的高端用户，可以通过更高的价格购电以保障他们精密设备的供电，而不需要额外投资优质的供电设备。此外，如果供电短缺，微电网可以切除低端用户的负荷来保证高端用户的供电。微电网的广泛运用、就地控制发电、需求侧管理（DSM）的备用容

量及储能装置可以有效地为敏感负荷供电，从而降低了主电网因受敏感负荷可靠性要求制约维持统一高水平的电能质量而产生的经济负担。

9.5 微电网与主电网之间的经济性问题

在微电网和主电网的关联中存在着一些经济性问题。基本的微电网示范项目与现有的主电网共存，微电网需要遵循主电网适用于所有接入设备的规程。从主电网角度来看，微电网相当于用户或发电机或两者兼有的一个集群，将导致传统经济法则的扩充。为了适应日益增长的负荷，配网系统有必要进行扩建。由于微电网中的发电机通常包含在辐射状的配网系统中，故而配网的扩建便不那么简单。因此，价格信号传输给新用户稍显复杂。价格信号在电力拥堵时仍然可以合适的方式传递给新用户，以鼓励微电网发展、增加发电装机投资及负荷控制、减少电力拥堵。然而，由于与周边配电网络配置的关联性，价格信号传输实施起来存在一定难度。在人口稠密的地区，任何一个终端用户按经济适用的意愿，可能有多个从邻近配电网接入的选择。由此可见，由微电网承担的电力拥堵成本取决于周边可用的配电系统运行模式，而这种模式的突然改变将影响当地微电网经济的关联性。

微电网需要全面参与到能源和辅助服务的市场中，但是它的低电压水平使其输送电能及提供服务的能力难以超越变电站。然而，通过合适的保护控制方案发挥微电网就地发电的优势，就可以为敏感负荷可靠供电。这对于整个电力系统的健康状态和经济性做出了有价值的贡献，实际上电力市场应对可变负荷的快速变化是不可行的。

9.6 微电网经济性：英国案例

在微电网经济性中，最重要的贡献之一是减少温室气体排放。2000年初英国成立了分布式发电协调组织（Distributed Generation Co-ordination Group，DGCG），基于微型CHP的发电技术备受关注，广泛使用微电网技术的潜力得到证实。同时，为使微电网成为英国能源系统重要贡献者，也明确了需要克服的障碍。微电网在英国的大范围应用必须解决一些重要的经济问题，以下将简要探讨这些问题。

9.6.1 微型发电

通过安装家用的微型CHP设备，小型的斯特林燃气发电机能为家庭提供所需的热能和电能，应用前景广阔。家用供热的需求表明副产品电能的冗余部分可以输送到国家主电网。DGCG认为在不久的将来，大量的家用热水器将被微型CHP设备替换，这预示着微型CHP在英国潜在的市场前景。由于高额的安装费用和低速的安装增长率，光伏阵列的前景并不被看好。然而，随着针对安装的优惠税收政策

和管理制度的不断出台，光伏阵列的安装费用将大幅降低，从而大大提高其微电网经济性。

9.6.1.1 并网费用

分布式发电接入配电系统共有三种收费方式，分别是：

（1）深度接入费用：该费用包括所有接入相关的费用，包括在远端或更高电压等级处产生的费用。这属于高成本收费。

（2）浅度接入收费：该费用包括接入到离配电网络最近的合适点的相关费用，不包括在远端或更高电压等级处产生的费用。这属于低成本收费。

（3）中度接入收费：在浅度接入收费的基础上，加上系统扩容的未定成本。这个收费介于深度与浅度接入收费之间。

DGCG 已经确定了以下连接和使用配电系统的收费选项：

情况 1：小型发电商支付深度接入费用而用户支付中度接入费用和其他系统扩容费用。

情况 2：用户支付浅度接入费用和其他系统扩容费用。

情况 3：发电商与用户共同承担所有浅度接入费用和其他系统扩容费用。

情况 4：发电商与用户共同承担所有中度接入费用和其他系统扩容费用。

情况 5：小型发电商支付中度接入费用，大型发电商支付特定场所的收费。

为了执行除情况 1 以外的上述收费方案，英国的天然气与电力监管当局（Ofgem）需要从根本上以价格控制的观点改变现有并网管理定价体系。与大型发电商只需要支付浅度接入费用相比，嵌入式小型发电商则由于需要支付深度接入费用而在经济上处于劣势。Ofgem 正在降低嵌入式小型发电商较大的深度接入费用，这对于改善微电网经济性而言是个积极的举措。

DGCG 的研究表明家庭及其他微型发电商更倾向于选择透明而简化的收费机制以及能够简单、快捷地接入配电系统的并网技术要求。这些因素可以鼓励更多的客户成为微电网范例中的客户发电者（Customer-generators）。

9.6.1.2 一些重要的经济性因素

需要解决的关键问题如下：

（1）仪表安装——安装测量发电量、电能输入/输出量和最大需量用仪表。

（2）技术要求——接入配电网后，成功并联运行的技术要求。

（3）接入费用——需要公平对待小型和大型发电商的接入费用。

（4）电价机制——电价机制包括计量、负荷分布及使用输配电系统传输电能的固定费用。

为了推广微电网和主动配电网的使用，应当设计合理的配电收费机制。配电网运营商（DNO）的主要收入来源是分布式发电的每一个机组对于配电网系统的使用（Distribution Use of System，DUoS）费用。小型发电商须支付 DUoS 费用，而大型发电商则不需要，这是微电网经济性的主要困难之一。按 Ofgem 指导原则，增加

配电网运营商收入的最优解决方案是在DUoS费用的基础上增设年度容量收费，即在配网内提供必要的发电与用电需求信息。此项费用对于大型发电商和小型发电商应当不存在任何差异。综合考虑现有的三个计量方案设计出最优方案：①单向计量；②双向计量；③根据现有负荷分布情况，进行输入/输出电能计量。研究指出实际的经济方案允许小型发电商根据发电情况维持现有的单向计量方式，或者坚持安装多寄存器电能输入/输出表计。为了尽最大可能解决微电网经济性问题并维持现有监管机制，DGCG正在对商业环境和市场规模的可能性进行调查研究，目的在于鼓励所有不同容量大小的DG的发展。

9.6.1.3 配电网运营商的收入

通过采用长期组合的方式同时考虑资金和运营成本，有利于DNO增加营业收入。DNO还有可能提供以下额外服务，增加营业收入：

1. 安全服务

1）提供配网容量。

2）提供客户服务改进建议。

3）提供电能质量改善建议。

4）提供电压支持。

2. 辅助服务

1）提供不一定针对电压调节的无功功率支持。

2）提供频率响应。

3）提供备用。

4）提供黑启动方案。

9.6.1.4 微型CHP潜在的市场问题

为了在英国大规模应用微型CHP，现已明确需要合理地解决以下关键问题：

1）大规模市场参与的并网方式。

2）产品检测与现场试验。

3）拥有熟练的安装和服务劳动力的合适交付链。

4）通过简化计量和合理的交易程序来使微型CHP发电的价值最大化。

5）审核公用事业“28天规定”，使能源供应商可以和零售商签订长期合同。

9.6.2 监管问题及监管活动

DGCG注意到，英国的电力市场并不欢迎大规模使用微电网发电。除了高额的安装费用外，微电网在参与开放市场时面临多重障碍。一些关键问题需要得到解决，如下所示：

（1）深度接入收费——与大型发电商不同的是，微电网发电商需要支付深度接入费用。

（2）高额的市场参与费——微电网发电商向主电网送电需要支付高额市场参

与费。为了鼓励家用微型 CHP 的安装，应该采用合理的供应协议使发电并网标准化。

(3) 计量设备——配电网只有单向计量装置，无法实现双向的供求计量。

(4) DNO 激励机制——对于小型发电机组的并网，DNO 没有得到任何政策支持。

Ofgem 正在考虑修改管理制度，解决收费和价格控制机制问题，鼓励微电网发电。

9.6.3 微电网发电技术：在英国的经济展望

从英国微电网发电的经济性可以看出，光伏阵列的投资回收期大约为 35 年，基于斯特林发电机微型 CHP 的回收期大约为 14 年，而家用燃气锅炉大约为 6 年。因此，从经济角度而言，用基于斯特林发电机的微型 CHP 替换集中供暖锅炉具有很大的经济效益。

微电网发电在税务规定上与公司部门存在差异，其没有任何资本减免。微型 CHP 的大范围应用需要合理处理这些差异。英国贸易与工业部的补贴方案应当适用于微电网发电。实行可再生能源义务许可证（Renewable Obligation Certificate, ROC）制度的收益有助于提高微电网经济性。微电网发电可以重新定义供应商与消费者的关系。按照价格信号和消费者偏好，运用分布式控制系统自动开关控制家用电器。这可以向人们灌输共同承担构建可持续能源系统的责任意识。

9.6.4 微电网潜在的经济效益

微电网具有以下可观的经济效益：

1）降低输配电成本和能源损耗的潜力。

2）相当高的总能源利用效率。

3）大大减少了小规模个人投资带来的资本曝光和风险，将容量增加和负荷增长紧密结合起来。

4）较低的资金成本有利于以低成本进入开放的竞争市场。

5）微电网的微型发电机能源效率非常高，能在微电网内与用户的发电机进行能源共享，从而不必向主电网以较低的电价输送电能。这也提高了微电网的经济性。

6）分布式发电额外的安全性和辅助服务也是微电网特有的优势。

经济方案的本质在于为长期而非短期融资。在绝大多数的可再生能源中，最初的资金成本主要由最低的运营成本构成。因此，用户的成本取决于融资条款和还款计划。对于光伏而言，长期融资方式已逐步为用户带来经济效益。

根据 DG 的整合程度和不同 DER 技术组合的情况，以英国为中心的微电网经济方案可分为以下几类：

(1) 方案 A——分布式 CHP 单元单独安装，不与微电网集成。这个方案中没有光伏和储能装置来测算与微电网集成后能够带来的增加值。经济评估是在微型 CHP 不与微电网并网的低电热比产能的家用能源基础上完成的。在与供电公司的上网电价协议中，可以安装或是不安装净计量表计。

(2) 方案 B——微电网与分布式 CHP 和电池储能装置集成，在冬天供应电能和热能。微型 CHP 装置的运行是出于家庭用户的热需求，因此，夏天的用电缺口由当地的电网弥补。

(3) 方案 C——微电网由微型 CHP、光伏发电和储能装置构成，能够独立运行。光伏的安装补贴从 50% 到全额不等。

当本地主电网的电价下降时，安装微型 CHP 装置来降低用户用电成本不太有效。一旦方案 A 在电力交易协议中实施，家庭用户不会从方案 B 中获得任何额外的经济效益。当独立分布的 CHP 渗透率到达配电系统承受极限时会达到经济平衡。此时，微电网的经济性支持微电网集成。除非 DTI 能实现补贴光伏发电安装费的 50%，或者降低 30% 的安装费用，方案 C 才会更加注重环境。这个以英国为中心的微电网经济性同样适用于发展中国家薄弱的供电系统中。

9.6.5　微电网经济性未来的发展趋势

DGCG 所做的经济性分析指出微型 CHP 配有足够的光伏阵列和备用电池能够满足微电网内的电力需求，从而实现不依靠主电网获得能源服务。微型 CHP 替代家用燃气集中供暖系统在经济上十分有利。因此，为大规模市场应用微型 CHP 进行基础设施建设极具经济价值，也会导致这些技术的公共信息资料增加。这就要求能源供应公司在节能举措及与可再生能源公司签约购售电的专业知识领域有所发展。同时这也有利于微电网在监管机构的支持下建立新的开放市场结构。新技术总是需要排除经济和监管的障碍。微电网的发展需要公共环境以及政策和商业上的支持，这跟全球气候环境所需的能源政策十分契合。

此外，急速扩张的市场需要加快改变相关的监管办法。采用 IT 新技术为微电网更好地实时控制实现商业化服务。微电网按照电价信号的主动需求管理可以为主电网削峰，实现大范围的节能降耗，向人们灌输有利于提高家庭能源效率的文化理念。一个包含光伏、微型 CHP 和小容量蓄电池的微电网可以完全独立于主电网，也因此能够安装在边远地区，而无需传输电缆，且在微电网外不会产生配电费用。微电网在对移除影响美观的电力电缆上也有恢复自然美的社会效益。这项技术可以减少现有集中式发电系统的最大需量，从而大大缩减运行和长期投资成本。微电网也可以进一步采取其他节能措施减少家庭和办公用电需求，以及按照《京都协议书》的要求减少建筑物温室气体的排放。微电网的全部潜能只有在电力市场和监管体系上做出必要的改变并生效后才能被完全开发出来。更多相关的细节，请参见附录 F。

9.7 结论

从电力工业和政府监管机构的角度，可以看到微电网在整合电力用户附近小规模发电机组方面具有多种优势。微电网可以作为一个组成部分与主电网并存，并能与当地配电网络进行必要的电能交换。微电网可以实现整体控制与当地配电网的电力平衡、频率和电压控制以及保证供电可靠性和电能质量。微电网并网相关的技术和监管问题需要按照不同国家的法律来解决。应当合理利用多样化发电满足能源需求，必要时允许微电网独立运行。目前微电网 DER 公开的组合有微型 CHP、光伏发电和蓄电池。当市场上可以买到燃料电池时，部分家用微型 CHP 可以被其替换为家用 CHP 发电机。以分布式发电现有的监管和经济框架为背景的微电网经济性分析指出，微电网可能在相当可观的能源需求方面具有多种经济效益。微电网的短期收益也有更多的可能性适用于长期发展。微电网可以直接促进其他节能减排措施的实施，减少家庭和办公用电需求，以及按照《京都协议书》减少温室气体的排放。总体来说，微电网确实具有减少建筑温室气体排放做出重大贡献的潜力，但是受到电力市场和监管体系必要的重大改变的制约。微电网的主要出发点在于发起上述变革，为社会带来更多效益。

第 10 章　微电网的市场参与

10.1　简介

电力市场改革给垂直一体化电力系统的垄断市场带来了巨大的变化。这种垂直一体化垄断的三个主要部分是发电、输电和配电。虽然在重组的市场环境下，这三个部分的主要职能保持不变，但是新型的分类计价和合作模式正逐步建立，以确保所有市场参与者的竞争和无差别准入，包括销售商和用户。

在早期，垂直一体化的电力公司在其管辖的范围内控制着配电、售电以及辅助服务，这对于用户来说是一种垄断。在这种垄断中，一家电力公司控制着整个发电、输电和配电的过程，由于没有任何竞争，导致其提供的电力供应在效率和可靠性上都与用户付出的费用不相称。通过市场重组以确保竞争，允许用户选择提供电力和辅助服务的供应商，因此可以保证用户更加经济地获得高质量的服务。这同样鼓励了小型企业参与电力交易，其可以选择与更便宜的供应商签订合同来购买电力。因为电力公司有义务在现有的输电线上传输其他电力供应商的电能并收取过网费，而且在扣除发电成本后，这个费用应该与该供应商传输自己所发电能的费用相同。所以，重组替换了传统的垂直一体化的电力系统，代之的是一个更加以市场为导向的电力系统。市场环境下的电价通过开放的竞争来确定，而不是由某个单独部门来强制规定。

重组通过开放和市场竞争显著降低了小型企业和用户的成本。允许用户选择电力供应商，这将有助于提高服务的可靠性水平。通过发电和输电系统互联的运行领域扩展，这种开放的市场竞争也提高了经济效率。

重组将开放输电服务以保证用户的自由选择，同时通过计量和通信新技术的应用提供竞争，创造新的商业机会。微电网被看做一个具有就地发电能力的整体可控负荷集，因此在重组的开放性电力市场中可以方便地参与电力销售和辅助服务。这就保证了相对低的成本下的电力系统的可靠性、电能质量和效率。

1996 年，美国联邦能源监管委员会（Federal Energy Regulatory Commission，FERC）颁布了推动开放竞争的非歧视性关税的最终法案，即 888 号条例，旨在促进发电趸售和输电服务的分开。此外，FERC 还为电子通信系统的发展颁布了 889 号条例，立项研究开放访问式同步信息系统（Open Access Same-time Information System，OASIS），推动了电力库、双边交易和混合三种主要重组模式的发展。微电网的市场参与将在以下各节讨论。

10.2 重组模式

为了削弱垂直一体化电力公司的垄断，电力市场重组发展出三种主要的模式，即电力库模式、双边交易模式和混合模式。这些模式包含了不同类型的竞争，以保证在开放的市场下对用户更好的服务。

10.2.1 电力库模式

电力库模式是指电能买卖的双方在集中市场中进行市场出清。在这种交易模式下，市场参与者提交需要卖出或者购入的电能总量以及相应的报价，市场出清保证市场库中所有供应商和用户的参与。通常由独立系统运营商（Independent System Operator，ISO）预测第二天的负荷需求，并接受以最低的成本和基于发电机组在成本最高情况下运行的电价来满足需求的投标。这种模式的主要特点是建立了互联输电系统服务的独立趸售电力库。这是一个对电力交易进行集中出清的市场，旨在引入竞争使发电商以市场出清价（Market Clearing Price，MCP）向电力库卖电，同时配电商以 MCP 从电力库购电，MCP 由电力库决定而与发电成本无关。使用最多的 MCP 是“被选中发电商机组的最高报价”，现货市场中最终的电价可能会高过 MCP，因为它还包含了 ISO 的系统运营费，其中包括与辅助服务相关的费用以及 ISO 的运营成本。电力库并不拥有任何发电或者输电的资产，它只是在其管辖范围内集中地调配电能。为了保证电力系统的高效运行，电力库负责输电网的维护，并向发电商和配电商收取同等的费用来补偿其运营成本。在电力库模式中，电能买卖的双方都需要为获得将电能注入电力库或者从电力库获取电能的权利进行竞争。卖方如果报价太高就无法向电力库注入电能，同样地，买方如果出价太低也无法从电力库获取电能。这样就确保了由经济分配产生单一的现货电价，因此为市场参与者提供了消费决策和投资决策的余地。因此，这种电力市场动态地促使现货电价达到一个竞争水平，该水平与大部分高效率市场参与者的边际成本相一致。在电力库模式下，卖方根据交易的电量收取费用，买方按实时消耗的电量缴纳电费。

10.2.2 双边交易模式

双边交易模式有时也被称为直接进入模式，因为 ISO 的作用被更多地限制了，因而允许买卖双方直接在电力市场中谈判而无须经过电力库。为了在这一模式下能够取得成功，小型电力用户需要作为一个整体来参与市场，以确保在竞争中获利。因此微电网作为一个具有用户侧发电能力的负荷集合，可以直接参与到电力市场中，并从开放的竞争中获得效益。

为了确保使用有效的输、配电系统进行电能销售，这个模式建立了输电系统和配电系统的无差别进入和竞价规则。电力供应商向输电公司和配电公司（Distribution

Companies，DISCO）支付输电网和配电网的使用费。发电公司（Generation Companies，GENCO）作为电力供应商，而输电公司（Transmission Companies，TRANSCO）作为合约方扮演电能公共承运商的角色，它们两者在收益的获取和赢得用户的选择上有着共同的利益。另一方面，DISCO 作为大量零售电力用户的集合，需要长期地提供电能。所签的合同内容包括电价、电量和交易双方在电力系统中的位置，而 GENCO 需要把发电计划通知 ISO，以确保有充足的资源来完成该交易和保证系统的稳定性。为了减少输电拥堵、保证电力系统的实时可靠性，电力供应商必须提供增减出力的报价以便无差别地使用输、配电系统。没有完成合同招标的系统使用者可以选择向别的电力供应商购买其负荷所需的电量，否则就得修改其负荷曲线。

10.2.3　混合模式

混合模式包含了上述两个模式的多个特性。在这个模式中，不强制市场参与者通过电力交易中心（Power Exchange，PX）来出售或者购买电能，并且允许用户选择与电力库中的供应商签订双边交易合同。买卖双方可以选择不签订任何双边交易合同，只通过电力库完成交易，从而使交易具有最大的灵活性，或者直接进行双边交易来买卖电能。选择通过电力库来参与市场竞争的 GENCO 需要向 PX 提交竞争性的报价。一般来说，除非输电线路出现拥堵，否则所有的双边交易合同都可以执行。双边交易合同外的负荷将按照电力库中 GENCO 竞价而来的经济分配进行电能供应。由于可以借助电力库高效地获取单个用户的电能需求信息，因此该模式可以简化电能的平衡过程。混合模式在提供基于价格和服务的市场选择上非常灵活，但是由于存在不同市场实体之间的直接交易，所以该模式在交易成本上会较高。

10.3　独立系统运营商

以下各节讨论了独立系统运营商（ISO）在微电网参与的电力市场中的功能。

10.3.1　背景

在服务成本控制的运行方式中，由于负荷预测时的不确定性，电力系统运行人员需要时刻平衡发电出力与负荷，以保证系统可靠性。垂直一体化的电力公司通过运作自己的系统来进行发电机组的经济调度以管理在控制范围内的购售电。在垂直一体化的垄断下，电力公司建立集中调度的区域电力联营体，以便在该区域的所有成员范围内更好地统筹发电、输电的计划与运行，从而提高效率、保持协调及备用共享。这将降低终端用户的用电成本。

一共有三种电力联营体，即①紧密型电力联营体；②宽松型电力联营体；③联合型电力联营体。

（1）紧密型电力联营体——通常以互联、计量和遥测的方式来约束其控制的

区域。他们在其区域范围内调节自动发电控制（AGC），并且通过联络线的功率交换来进行互联区域的频率调整，他们也为其成员提供基于秒级的发电机组组合、电力调度和交易计划服务。

（2）宽松型电力联营体——该电力联营体对于发电、输电的计划和运行的协调配合水平没有紧密型电力系统高。在紧急情况时，该类电力系统所提供的支持对于其成员来说十分重要。然而，在其区域内，他们不提供任何电力系统的控制服务。

（3）联合型电力联营体——对不同成员拥有的发电机组作为一个单独的实体来进行调度。该电力联营体的成员通过签订内容广泛的协议来控制发电和输电成本。

随着电力供应商的大量增加，在输电拥堵时进入输电系统会受到限制。垂直一体化的电力公司的成员通常不会允许其他公司和电力供应商完全接入自己的输电系统。此外，电力系统会控制该区域内输电系统的接入，使得非成员要使用该输电系统的设备变得非常困难。区域电力系统也采取对成员的限制性管理模式，关闭区域内成员的对外联络通道。这些不公平的行业惯例妨碍了开放性竞争发电市场的发展。正是由于这样的原因导致了ISO的出现和发展，美国联邦能源管理委员会（FERC）颁布888号条例，要求输电系统拥有者为其他没有输电设备的电力供应商提供同等的输电服务。规定输电系统拥有者通过自己的输电系统进行趸售和购买电能时，所需的输电费要与征收其他电力供应商使用该输电系统的费用一致。这是破除输电系统持有者输电垄断的开始，促进了ISO的发展，同时在FERC的鼓励下，ISO执行开放平等地进入输电系统的政策。

ISO是一个完全独立于其他市场参与者（发电商、输电系统运营商、配电公司（DISCO）和终端电力用户）的市场实体，其功能是保证电力市场参与者公平、无差别地获得输电、配电和辅助服务，并且保持电力系统实时运行的可靠性。好的ISO的实施手段要能确保独立的输电系统运营在电力交易中无任何差别。此外，FERC的889号条例确保所有市场参与者都能从开放访问式实时信息系统（OASIS）中获取与输电系统相关的信息。

10.3.2 ISO的作用

ISO的主要任务不是发电调度而是平衡电能的供需，以确保系统的可靠运行。只有在必要的时候，例如保持电力系统可靠性和输电效率最优时，ISO才能控制发电出力。ISO需要不断地评估输电系统的状态，并根据评估结果来批准或者拒绝输电服务的请求。ISO主要负责保持输电系统的实时可靠性，以确保系统的完整性、基于秒级的电力供求平衡和系统频率维持在可接受范围内。必要时，即便输电系统受到某些约束和限制，ISO也可以调度电能来保证电力市场的可靠运行。它还可以包含和控制电力交易中心（PX）对所有发电机组进行平滑的调度，并且基于电力市场中的最高竞价以小时为单位设定电价。根据FERC的888号条例，ISO必须提供以下六种类型的辅助服务：①计划、控制和调度服务；②无功补偿和电压调整；

③频率调节和频率响应服务；④电能不平衡服务；⑤运行备用、旋转备用和事故备用服务；⑥减轻输电约束。FERC 的 888 号条例也指出，输电系统的用户可以自行提供这些服务或者通过 OASIS 系统从 ISO 处实时购买这些辅助服务。

ISO 提供的基本服务是把减轻输电约束的费用分摊到用户的账单中，并用其来支付给提供减轻输电约束服务的市场参与者。在这个过程中，ISO 必须发送适当的经济信号给所有的市场参与者，以鼓励他们有效地利用输电服务，从而减轻输电约束。在紧急情况下，维持电力系统的可靠性是 ISO 不可推卸的责任。此时为了系统的安全，ISO 拥有决定发电机组组合、发电调度和削减负荷的权限。一个 ISO 可以通过竞拍的方式选择辅助服务供应商，在成本最低的基础上考虑时间、位置约束和希望使用的辅助服务资源几个方面来选择优胜者。如果实时市场中服务资源的价格比合同中的便宜，ISO 有选择在实时市场中完成交易的自由。

10.4　电力交易中心

电力交易中心（PX）是一个在开放竞争的基础上交易电能和其他辅助服务的共同市场。有时它也被叫做现货电价库，因为它允许不同的市场参与者以竞争的方式根据电量来竞价，从而买卖电能和其他辅助服务。PX 是一个非政府、非盈利的独立实体，它接受负荷预测和发电计划，并提供一个快速的电子拍卖市场以便市场参与者易于电力交易。它为次日买方和卖方的交易制定以小时为单位的市场出清价(MCP)。通常 PX 负责信用管理和供需调度与平衡，以确保所有市场参与者都可以平等地参与市场、享有竞争的市场环境和同等的机会。它简化了日前市场和时前市场(Day-ahead and Hour-ahead Markets)，使得电力交易更加经济。参与者包括发电企业、电力营销商、经纪商、负荷整合商、电力零售商、工业用户和联合发电商：

(1) 发电企业——拥有多台发电机组的企业。

(2) 电力营销商——发电企业发挥其市场支配力量的代理机构，代表发电商的利益。它是一个中间人，负责在买卖双方之间安排输电服务或者辅助服务。电力营销商声称有能力为零售用户降低电价并提供风险管理服务。

(3) 经纪商——通过合同谈判来购买电能和其他服务的代理商，不拥有任何发电或输电设备，没有所购买或者出售电能的所有权。

(4) 负荷整合商——市政或者私人组织的联合众多终端用户的实体，以便更好地处理电能的买卖、传输和其他服务，代表这些小型用户的利益。它通常将买家联合起来以提供额外的服务，为其客户与电力零售商和电能服务公司以合同的形式进行谈判。

(5) 电力零售商——电力服务的提供者，负责与终端用户进行直接交易。他们彼此间在电价和服务上进行竞争，向终端客户销售电力和辅助服务。

(6) 工业用户——自己拥有配电变压器和配电设施的用电大户。它可以直接

参与开放的市场竞争。

(7) 联合发电商——自己拥有发电机组的实体，生产电力和其他形式的有用热能，这些热能用于工业或者商业的制热和制冷。联合发电商可以从同一种燃料源同时生产电力和有用的热能。

拥有热电联产（CHP）的微电网和非 CHP 的微电源（分布式能源，DER）非常适合于工业用户和联合发电商，并且可以参与 PX 的交易。

10.5 市场出清价

PX 同时接受买方和卖方的报价来决定交易当日 24h 中每个小时的市场出清价（Market Clearing Price，MCP）。计算机收集和整理买卖双方有效的报价，绘制出电能供应曲线与负荷需求曲线，两条曲线的交点就是 MCP，它是总的供需图上达到市场均衡时的平衡价格。如果发电商的报价低于 MCP，其收益会遭受损失，而如果发电商的报价高于 MCP 将会导致其发电机组很少或者没机会运行。

10.6 日前市场和时前市场

在日前市场中，针对调度日全部 24h 的每一个小时，卖方为其电能供应计划报价，同时买方以不同的价格对其负荷需求计划报价，用于确定每小时的 MCP。卖方和买方需要分别对所售电能的来源和所买电能的输送点作详细的说明。由于独立系统运营商（ISO）负责电能的输送，所以在 PX 最终确定交易计划前，ISO 将会根据输电拥堵和辅助服务的情况对供应和需求进行调整。

时前市场与日前市场类似，不同之处在于：交易以每小时为单位；减少可用输电容量（Available Transfer Capability，ATC）到只包括日前交易；不需重复报价。在 MCP 确定之后，市场参与者需要提交给 PX 的附加数据包括个体发电计划、负荷接入点、涉及输电拥堵管理的报价调整和辅助服务报价。这使得 ISO 和 PX 可以掌握每台发电机组对于输电系统的接入点。

由国家教育研究与评估中心（NEREC）（www.nerec.com）定义的有关日前和时前市场的术语有：

(1) ATC——Available Transfer Capability，可用输电容量，是指物理输电网络在已使用的输电容量上可进一步用于商业活动的剩余输电容量。

(2) TTC——Total Transfer Capability，总输电容量，是指在一定的约束条件下互联输电网络能可靠传输的电力容量。

(3) TRM——Transmission Reliability Margin，输电可靠性裕度，是指在不确定的系统运行方式下，保证互联输电网络在合理范围内的安全性所必需的输电容量。

(4) CBM——Capacity Benefit Margin，容量效益裕度，是指负荷服务企业

(Load Serving Entity，LSE）为满足发电可靠性要求，应保证从发电系统进入互联系统的备用输电容量。

上诉四个量之间的关系是：

$$TTC = ATC + TRM + CBM$$

10.7　弹性与非弹性市场

非弹性市场无法提供足够的市场信号去激励用户根据电价调整其负荷需求，这样用户没有足够的动力来调整其负荷需求以适应市场情况的变化。因此，市场出清价主要取决于电力供应商的价格结构。在推行开放的电力市场之前，电力行业已经在这种无弹性需求或者固定负荷的模式下运行了数十年。

与之相反，弹性市场提供了足够的市场信号和激励机制来鼓励用户根据市场情况的变化调整其负荷需求，以减少他们的总用电成本。

10.8　市场支配力

市场支配力的定义是，单个的或一组销售商具有推动市场价格在竞争水平之上并控制市场整体输出，在相当长的一段时间里阻止其他竞争者参与相关市场的能力。因此，市场支配力带来的垄断会阻止预期的市场参与者进入开放竞争的环境，从而降低供电服务质量和可靠性，妨碍了技术创新，导致不合理的资源配置。当一个发电商在总可用发电容量中占有较大份额时，市场支配力就会被有意地使用。当输电约束限制了一个特定区域的输电容量时，为了维持系统稳定而迫使消费者从本地供应商处以较高的价格购买电能，市场支配力也可以被偶尔使用。在出现输电约束的情况下，距离较远的发电机组将被限制供电，所以由本地电力供应商主导市场价格。由于电表无法以小时为单位分时计量，这使得发电商为了自己的利益而抬高电价，所以有时电力用户不得不支付在非用电高峰期间与电能使用量无关的更高的费用。输电部分也可以通过给一些特定的联合发电商提供输电信息来行使市场支配力，这将会阻止其他参与者参与开放市场的竞争。

市场支配力有两种类型：

（1）垂直市场支配力。

（2）水平市场支配力。

10.8.1　垂直市场支配力

这是单个公司或者联营公司在发电和输电过程中控制整个市场流程瓶颈的权限，这个瓶颈体现在电能只能通过输电线路传输给有意购电方。流程瓶颈的控制使得该公司及其联营公司较之竞争对手能优先行使市场支配力，这导致了在其控制下

输电和配电设施的滥用。

一个成功、计划周详、功能完善的独立系统运营商（ISO）可以解决垂直市场支配力带来的问题。

10.8.2 水平市场支配力

这是指占主导地位的公司或者一群公司通过控制发电限制出力的能力，故此其可以根据自身利益控制市场价格，它源于在特定的市场区域内所有权过度集中而带来的局部控制。它也可以被看做是一种影响力的滥用，这种影响力体现在，一个特定团体可以简单地通过保留发电出力来维持供应——需求的均衡，这最终导致了更高的市场电价。

赫芬达尔 - 赫希曼指数（Herfindahl - Hirschman Index，HHI）可以定量地表示市场支配力。HHI 被定义为所有市场参与者的市场占有率加权总和，可以定量地表示为参与者市场占有率的二次方和：

$$\mathrm{HHI} = \sum_{i=1}^{N} S_i^2$$

式中，N 是参与者的数量；S 是第 i 个参与者的市场占有率。

通过 ISO 的成功运营也可以消除水平市场支配力。

10.9 搁置成本

搁置成本（Stranded Cost）是指由传统垄断的电力公司不经济的和低效的委托或投资产生的成本，但是这种成本在开放竞争的电力市场中不大可能通过出售电力来回收。搁置成本是一个行业重组过程中的术语，基本上是指在垂直垄断下期望回收的成本与在开放竞争的市场下所回收成本的差值。

在垂直垄断下，电力公司可以强加更高的电费到终端用户身上来获取可观的收益，从而回收其成本。然而，从垂直垄断到重组的电力市场的转换，很可能迫使这种低效的投资在开放竞争的市场下无法回收成本。因此，搁置成本的回收在重组的电力市场中仍然是一个主要的经济问题。

10.10 输电定价

输电网是决定市场竞争的主要因素，因此输电定价在开放竞争的市场中是一个非常重要的方面。根据美国联邦能源管理委员会（FERC）的指导文件，输电定价要满足输电网所有者原有的收益需求，并且能反映出可比性，例如对于同样的输电服务，输电网所有者和其他参与者的输电成本应该相等。定价机制也必须有足够的实用性，以提升公平性和经济效率。

尽管输电成本与发电成本和电力公司运营成本相比只是一小部分，但是由于输电的功能在市场竞争中起着关键的作用，所以输电成本是十分重要的。此外，输电系统可以通过提供真正的价格信号来提高发电市场的效率，这种信号可以当做为适应未来负荷的变化而增加输电容量和发电容量的依据。额外的输电容量也可以缓解输电拥堵，因此可以允许更加经济的发电技术代替昂贵的技术，最终为电力用户进一步节约电费。

输电费用可以由两种方法来确定：

（1）合同路径法。

（2）兆瓦—英里法。

10.10.1　合同路径法

在合同路径法中，输电价格根据预定的潮流路径来计算。由于存在功率环流的平行潮流路径，这种输电定价的方法不够精确，因此，输电网所有者只能收到输电设备实际使用费的一部分。这种方法的另一个缺点是输电费用的“叠煎饼”（Pancaking）现象。

在互联电力系统中，平行路径或环网潮流基本是指电能传输过程中出现在相邻输电系统中的非计划的潮流。“叠煎饼”现象定义为潮流穿过指定的输电权限的合同路径边界的输电费用。额外的输电费用会增加到电力交易的总费用中，使总的输电价格升高。“叠煎饼”效应可以通过独立系统运营商（ISO）的区域电价方案来消除。在这个方案中，ISO 控制的输电系统被划分为几个区域，输电网的使用者需要支付这几个区域的基本电价。输电费用不取决于任意两个区域间潮流的路径和穿越次数。

10.10.2　兆瓦-英里法

一些 ISO 采用兆瓦-英里法来进行输电定价，该方法根据潮流途经的距离和每条输电线上潮流的大小来计算输电费用。这种方法可以解决环网潮流的问题，并且不考虑输电线路上的反向潮流。然而，这种方法的输电定价对于综合所有输电线路上全部能源价格而言相当复杂。

10.11　输电拥堵管理

输电拥堵是指输电线路或者变压器上出现功率过载的情况，它可能由输电线路停运、发电机组停运、电能需求变化、电力交易协调失误等原因引起。输电拥堵将会妨碍新电力交易合同的签订，使得现有的交易合同无法完成，并且会导致额外的电力中断，某些区域出现电价的垄断以及系统设备的老化和损坏。输电拥堵在一定程度上可以通过容量预留、输电权交易和收取拥堵费用来部分防止，也可以采用技

术上的控制，例如移相、在线变压器分接头有载调节、无功 VAR 控制、重新调度、重新安排发电计划和削减负荷来应对。缓解输电拥堵最快的方法是切除发生拥堵的线路，以防止输电拥堵对系统设备造成严重损害。

美国联邦能源监管委员会（FERC）关于输电拥堵管理的指导原则如下：

1）对于输电线路的使用建立明确、可交易的权利。

2）提高区域调度的效率。

3）支持输电权交易二级市场的兴起。

4）应该给市场参与者提供对冲节点电价差的机会。

5）输电拥堵定价要保证那些为系统负荷服务的发电机组在输电约束下的调度成本最低。

6）应确保输电容量被那些最能体现使用价值的参与者使用。

尽管存在困难和成本过高的问题，但是基于节点边际电价（Locational Marginal Price，LMP）和固定输电服务金融权的输电拥堵管理可以在电力市场中有效地实现。这是因为存在以下几个因素：

1）LMP 必须根据用户同意的实际调度情况和系统使用情况，直接把拥堵费用分摊到输电费用中。

2）LMP 应该协助建立金融输电权，并且让用户支付已知的费率，从而对冲输电拥堵费用。

3）金融权持有人有资格享有输电拥堵收费带来的收益，因此可以解决输电成本过度回收的问题。

另外一个输电拥堵管理的策略是物理输电权方案，物理输电权可以在二级市场进行交易。首先独立系统运营商（ISO）通过拍卖或分配的方式发布这些输电权，这使得市场参与者在通过受约束的接口（Interface）提供电力服务之前就对特定的输电接口享有了充分的所有权。因此，ISO 在输电拥堵管理中的作用在很大程度上就被削弱了。尽管这种方案在输电拥堵不严重或者不频繁发生的区域中被证明是可行的，但在拥堵严重的区域中则不可行。

根据 FERC 的指导原则，为了电力系统的稳定性，ISO 有权命令重新调度电力，但这也要看拥堵管理的市场机制。如果市场机制无法减轻输电拥堵，ISO 有权削减一些导致拥堵的输电服务交易，但是 ISO 不能仅出于拥堵管理的目的而对发电机组进行重新调度。在垂直一体化的垄断下，输电拥堵的成本要么被忽略，要么被隐藏在输电费用中。输电拥堵管理系统的主要缺点是缺少使输电资源有效配置的真正的价格信号。

10.11.1 输电拥堵定价

输电拥堵成本考虑到重组的要求，把这些成本分摊到输电系统的使用者身上，分摊成本时要采用公平的方法使之能反映输电系统的实际使用情况。拥堵定价有三

种基本的方法：①按对拥堵成本的影响分摊；②LMP；③收取区域间联络线的使用费。

(1) 按对拥堵成本的影响分摊——该方法适用于输电拥堵不严重的系统。这个方法中，拥堵成本根据负荷比率分配到输电系统中的每个负荷上。

(2) 节点边际电价（LMP）——该方法基于为输电网中指定节点处负荷的下一次增加提供电能的成本。买方的电价由开放竞争的电力市场中指定节点的 LMP 和输电拥堵成本决定，两节点间的 LMP 差值就是拥堵成本。输电系统中所有节点的 LMP 都是由市场参与者提供给电力交易中心（PX）的报价计算而来。

(3) 收取区域间联络线的使用费——在该方法中，ISO 控制的区域根据受约束的线路的历史拥堵情况分为若干拥堵区域。根据市场参与者自愿提交的调整发电出力的报价来向整个输电系统的用户收取区域间联络线的使用费。这种报价可以显示出市场参与者为发电机组增、减出力支付相应成本的意愿。

10.11.2　输电权

输电权可以保障输电系统容量得到高效利用，并且确保输电容量分配给最能体现其使用价值的系统用户。这些可以交易的输电权允许买家使用输电容量并且在物理上使用输电系统。这使得企业可以用比较便宜的成本购买可用的输电权，而无须花大的投资建设新的输电系统。可以通过给那些使输电容量价值最大化的用户提供容量预留服务，以提高输电系统的使用效率。

虽然固定输电权在概念上属于金融权利，但是它等同于物理上的权利。这种金融形式的交易更加容易，而且输电系统的使用并没有与所有权捆绑在一起。这种金融权基于输电网络电能输入和输出节点。根据两节点间的电能 LMP 差额，持有输电权的市场参与者支付或者获得等值的货币。独立系统运营商（ISO）对输电权的出售与购买集中组织拍卖。输电权的持有者可以在二级市场中按照双边合同自由地交易他们的权利。

10.11.3　区域间和区域内的输电拥堵管理

输电网在开放的电力市场中扮演了一个主要的角色。移相器和可调分接头变压器可以起到防止和缓解输电拥堵的作用，这些控制器可以帮助 ISO 在不需要重新安排发电调度计划的前提下缓解输电拥堵。随着考虑到区域外和区域内潮流及其对电力系统影响的管理方案的实施，输电拥堵管理变得更加容易。这些拥堵管理的主要目标是最小化优先调度计划的调整次数，这些计划是在出现事故紧急约束的限制下，使用控制器来最小化区域间的相互影响。

与拥堵管理惯例不同，新的合同要在拥堵的输电线路上标出潮流方向的改变。诸如移相器、可调分接头变压器、FACTS 控制器的控制装置通过控制线路潮流，对缓解重组市场环境下的输电拥堵起到了至关重要的作用。移相器和可调分接头变

压器的合理配合可以增加电力交易的可能性和可行性，从而提高系统的性能和合同的交易量。ISO 可以通过①在减缓拥堵时考虑事故紧急情况的限制，②最小化调节次数，③消除区域间、区域内和跨境区域内次要问题之间的相互影响，来实现更高效的输电拥堵管理。

在收到电力交易中心（PX）的优先调度计划后，ISO 要做系统的事故分析，识别出当前拥堵管理模式下最严重的事故情形。之后，ISO 明确区域内和区域间的输电拥堵情况，在不考虑调度协调员（Scheduling Co-ordinator，SC）的优先调度计划情况下，最小化总拥堵成本。SC 代表负荷整合商、电力零售商和用户与 ISO 协调每小时的配电计划和发电机输入电网的功率与电网输出功率的平衡计划 。ISO 用增加或减少发电机出力的报价来缓减输电拥堵。区域间的输电拥堵比区域内的更为频繁，因此先解决区域间的突发事故再解决区域内的。ISO 对区域间的输电拥堵逐个进行核实，为了避免对优先调度计划作出调整，所以 ISO 对任何拥堵都先尝试通过控制器的动作来解决。对 ISO 来说，重新安排调度计划是解决输电拥堵的最后手段。如果没有检测到输电拥堵，PX 和 SC 已提交的优先调度计划就被接受为最终的实时调度计划。

10.12 微电网在电力市场竞争中的作用

10.12.1 零售转运

根据发电技术的不同选择，电力行业的重组对于电力公司的企业结构、电能产品和服务的价格、电能配送服务的质量等方面有着潜在的影响。ISO 在电力趸售市场中输电层面的输电接口已经被较好地定义并且被业界广泛接受。如今，为了发展用户可以直接进入的开放竞争的零售市场，电力行业的重组需要将竞争市场扩大到电力零售层面。在这个市场中，用户可以自由地选择他们的电力供应商。微电网只有进一步地整合技术上和制度上的变化才能更好地参与到零售转运（Retail Wheeling）的市场中去。

零售转运是输电、配电及电力消费市场的新模式，其目标是降低电能成本。借助零售转运，电力企业可以向远处的电力用户销售电能，用户也可以从较远处的电力企业购买电力。为了提高成本效率，中间商需要借助分布式能源技术（如微电网）来免除输电和配电的费率。零售转运可以在不需要本地中间商介入的情况下，使用户向电力供应商购买更便宜的电能。因此，从用户的角度来看，微电网参与开放竞争的零售市场很可能是有益的。微电网可以在开放的零售市场中，利用零售转运的机会向用户销售电能和各种辅助服务。

要从零售竞争发展到开放的收支循环服务，应该从计量和计费开始。对于用户的概况，零售竞争的拥护者应该掌握足够的信息。竞争性的零售市场可能需要经历

相当大的改变，才能适应微电网在配电和系统运行方式中使用的新技术。为了明确定义微电网参与开放的零售电力市场的标准，应该制定相应的商业和监管框架。

只有当鼓励配电网层面的用户从微电网购买电力和辅助服务时，才会出现微电网的零售转运。此外，零售市场必须保证微电网可以通过竞争将多余的电能输入主电网。微电网多余电能的零售转运取决于变电站变压器的运行工况。如果这部分多余的电能被禁止输入主电网，那么这些电能就成为过剩电能，将会强加在电力买卖双方额外的输、配电成本上，还可能会引起对购售双方的拥堵罚款。为了把多余的电能出售给其他配电系统，微电网必须在本地通过相关的输电系统拥有者/运营商在零售市场上出售电能。

10.12.2 辅助服务

微电网可以为电力系统提供潜在的辅助服务以维持其电压/频率的波形、稳定性和可靠性。分布式能源迅速增加机组出力和关停机组的能力肯定可以让微电网抓住短期的销售机会，例如选择出售旋转备用。借助电力电子接口（PEI），微电网发电机组可以全面具备提供无功功率的能力，为配电网提供电压支持。通过合理配置 PEI，可以使其为辅助服务提供必要的无功功率。微电网完全有能力在开放的零售市场上出售电能、辅助服务，为系统频率的稳定提供支持，同时可以保持易受配电系统中负荷波动和其他紧急事故影响的电压波形。

在独立系统运营商（ISO）的运行与控制下，输电层面的辅助服务趸售市场已开始运作。虽然微电网所能提供的辅助服务是全方位的和有用的，但是主要障碍来自配电网层面缺乏为辅助服务搭建的开放的零售市场，这导致了零售市场竞争中出现负面的影响。与由配电网提供的辅助服务相比，目前尚无平等对待微电网中分布式能源（DER）提供的辅助服务的零售市场机制，这导致了微电网辅助服务与其成本效益间的矛盾。因此，在建立零售电力市场的同时，建立可以使得微电网参与的开放的辅助服务市场也是相当重要的。

在垂直一体化的垄断下，辅助服务由集中的发电机组提供，在传送这些服务时会产生很大的系统损耗，因此增加了输、配电的成本。因为微电网 DER 离用户很近，用户除了可以从其处购买电能之外，还可以用更便宜的费用购买由微电网提供的全方位的辅助服务，这将大幅减少输、配电的电能损耗。

只有当辅助服务是由电源提供时，微电网的辅助服务才能在开放的市场中全面参与竞争。因此，关于辅助服务的强有力的政策激励和有效的市场开放机制是发挥微电网模式中 DER 全部潜力的前提条件。

10.12.3 整合商的作用

如果 ISO 在处理大规模相对独立的资源时面临困难，那么 DER 直接参与零售市场是行不通的。最终就需要将 DER 整合起来，才能促进微电网的发展。然而，

大规模的整合 DER 需要安装大量的通信设备来处理海量信息。在这种情况下，整合商可以为 ISO 提供足够的帮助来管理 DER 的机组，从而帮助 ISO 和 DER 建立一座跨越控制和管理问题沟壑的桥梁。整合商可以成为与 ISO 单独联系的纽带，在 ISO 处理大量 DER 问题时，与其他电源互动一样，为其提供合理的发电容量。

虽然趸售市场和零售市场的功能和特性不尽相同，但是这两种市场之间有大量的相互作用。在一个包含大量参与者的复杂电力市场环境中，整合商对于市场的正常运作发挥着不可或缺的作用，整合商通常可以根据其收集的供需信息来进行电能交易。由于零售市场中有大量的参与者，趸售市场中参与者数量相对较少，所以整合商在零售市场的作用要远远大于其在趸售市场上的作用。此外，大多数 DER 的投资者更愿意与拥有丰富电力市场经验和熟悉 DER 功能的第三方共同对其生产的电能进行交易和管理。DER 发电的整合主要关注：①DER 的电能供应；②对 DER 的电能需求；③DER 提供的辅助服务。

配电网运营商（DNO）验证并确保配电网运行的可靠性。在零售市场参与者数量特别多的时候，整合商可以显著地减少 ISO 和本地 DNO 的工作负担。DER 的电能在零售市场中的交易流程如图 10-1 所示。

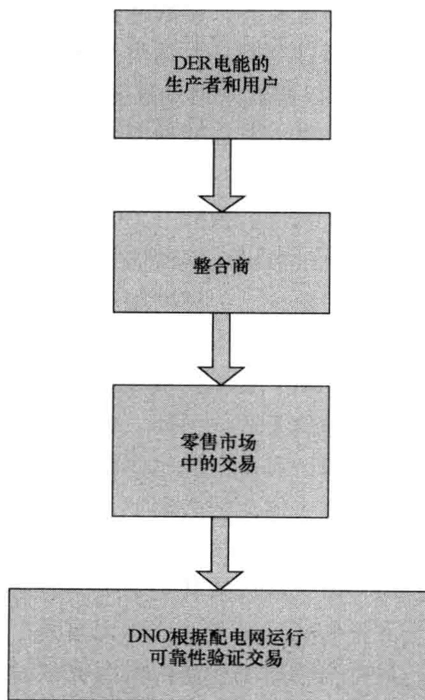


图 10-1 DER 参与零售市场的电力交易

因为分布式能源（DER）发电的主要优点是消除了输、配电成本，所以整合商可以照顾到本地的配电系统。如果需要向其他区域转运剩余电能，整合商将会把相关的输、配电成本以及可能出现的输电拥堵费用包含进其电价中。批量电力发电机组通常参与趸售市场，但是其也可以选择在整合商的帮助下参与零售市场的竞争。无论电能在哪个市场进行交易，都由 ISO 全权负责验证和确保输电网上电能交易的可靠性。DNO 只负责验证配电系统中零售交易的可靠性。零售市场和趸售市场中电能交易的流程如图10-2所示。

在通过协商确定提供给每种辅助服务的可整合发电容量和价格后，整合商可以帮助有兴趣的、潜在的 DER 投资者来参与辅助服务市场。之后，整合商可以与 ISO 反复协商辅助服务的价格。因此，整合商需要分别建立与 ISO 和 DER 机组的通信网络。

整合商通过与辅助服务市场和 DER 的持有者实时协商，来确定整合费用和委托整合的总量。整合商把收集的 DER 容量进行整合，形成一个用于日前和时前市

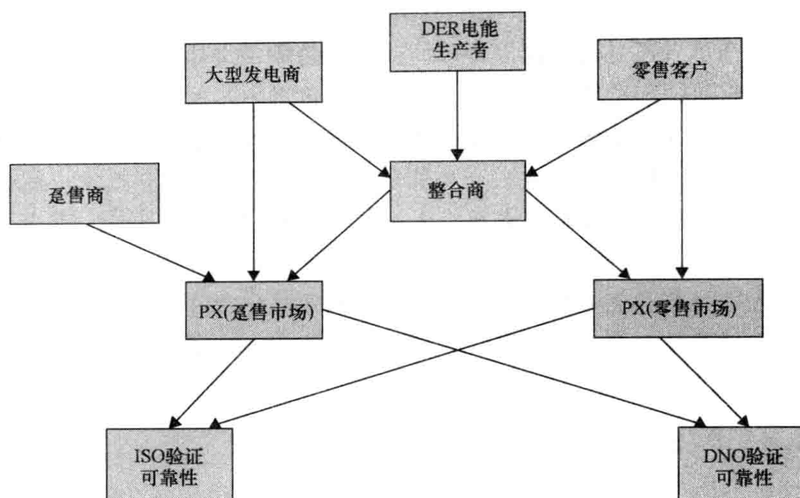


图 10-2 DER 在电力市场下的广泛参与

场上清晰的辅助服务报价，之后履行这些辅助服务。根据针对辅助服务提供者建立的市场规则，整合商还要参与 DER 机组的性能评估和补偿。不同于垂直一体化的垄断环境，市场规定需要通过竞价机制来进行辅助服务价格的商谈。

10.13 结论

分布式能源（DER）技术以符合成本效益的方式充分地运用在输电拥堵管理中。因为 DER 发电可以容易地安装到电力系统的高电价区域，所以输电拥堵定价可以用来激励 DER 投资者。只要输电拥堵继续存在，将 DER 部署在高电价拥堵区域从经济上来说就是可行的。如果安装新的输电设备可以解决输电拥堵，那么 DER 拥有者就不可能在零售市场中有竞争力。因为与集中发电的机组相比，尽管 DER 大幅降低了输、配电成本，但是 DER 的发电成本相对来说还是较高。再者，如果剩余的电能不能以零售转运的方式有效地调度到其他配电网络，DER 发电商还得为输电拥堵的成本付费。由于要考虑输电设备的使用成本，所以 DER 的电价还可能会因为零售转运而升高。这对于 DER 投资者在高电价拥堵区域部署 DER 发电来说是一个潜在的威胁。此外，把 DER 发电部署到低电价区域在经济上还是不可行，除非考虑让 DER 提供的高效辅助服务参与到开放的零售市场中。

DER 技术成功运用的潜在障碍是，在开放竞争的零售市场中未能对电能和辅助服务设定适用范围。如果 DER 技术在辅助服务、联合发电设备和最小化环境影响等方面的潜在优势，不能恰当地使用并在开放竞争的零售市场中出售，那么 DER 在市场竞争中将会很难幸存下来。

微电网的新模式是成功实现 DER 技术成本效益和配电系统高效运行的唯一解

决方案。由 DER 技术提供的用于保持系统安全、可靠、电压波形及频率的可用的辅助服务，完全可以通过微电网以合理的、较低的成本来使用。在重组的时代，电力行业需要政府机构和监管委员会的介入来进行更进一步的电力重组。这就需要为微电网建立一个开放竞争的零售市场，使其能以具有竞争力的价格来提供电能和辅助服务。如果微电网中具有热电联产功能的 DER 机组完全由有热发电能力的系统控制，那么这些机组就能在最高效率点上运行。这样就可以对电能、热能和辅助服务进行交易，当然，只有当完全自由和开放竞争的零售市场建立之后才能实现。因此，通过对家庭余热和工业制热制冷的利用，使最小化温室气体排放和大幅减弱全球变暖现象的绿色电力模式得以实现，在这种模式中，微电网可以成功地作为一种可选择的电力系统。

附　　录

附录 A　独立运行和并网模式下微型燃气轮机的建模和性能分析

A.1　模型描述

本节讨论了由微型燃气轮机（MT）和同步发电机组成的微型燃气轮机发电机（MTG）系统的建模与仿真。该模型常用于独立运行和并网模式下 MTG 系统的负荷跟踪分析。仿真是在 MATLAB 的 Simulink 平台上完成的。

MTG 用于分析系统慢动态性能而不是其暂态特性。因此，建模基于以下几点假设：

（1）系统运行于正常工况下。机组的起动、停止和电网快速的动态变化（如故障、失电等）不包括在内。

（2）MT 的机电特性是主要的关注点，换热器仅仅作为用于提升机组效率的热交换器，并不包含在模型中。另外，由于换热器响应时间非常缓慢，它对动态仿真的时间段来说影响很小。

（3）燃气轮机模型中省略了温度和加速度的控制，因为它们对正常运行工况没有影响。温度控制作为输出功率上限，在正常的运行工况下，燃气轮机温度保持稳定，因此，它可以从模型中省略。加速度控制主要用于限制燃气轮机从起动至到达工作转速之前的转子加速速率。如果系统的工作转速更加接近额定速度，加速度控制可以在模型中消除。

（4）因为 MT 没有使用任何调节器，所以省略了调节器模型。

MT 模型的简化框图如图 A-1 所示。

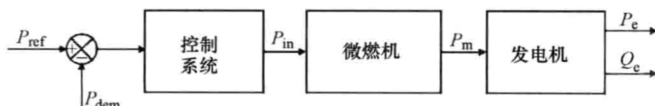


图 A-1　微型燃气轮机模型

有功功率控制是重点，因此，整个控制系统简化成一个有功功率比例积分（PI）的控制功能。有功功率控制应用于燃气轮机上。有功功率控制表示为一种如图 A-2 所示的传统 PI 控制器。

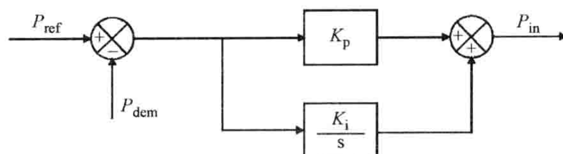


图 A-2　控制器模型

控制器模型变量如下：P_{in}，应用于 MT 输入的有功功率控制变量；P_{dem}，实际负荷需求；P_{ref}，设定功率参考值；K_p，PI 控制器的比例增益；K_i，PI 控制器的积分增益。

用于仿真的标准 GAST 燃气轮机模型如图 A-3 所示。GAST 模型的优点是简单的遵照了典型指南，并且是一种 WSCC（西部系统协调委员会）模型，可以直接用在特定的商业仿真程序上。

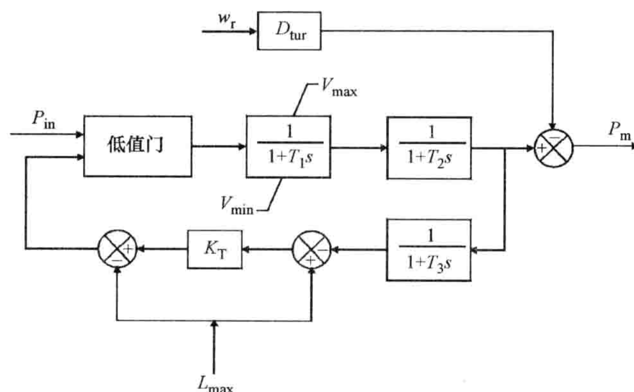
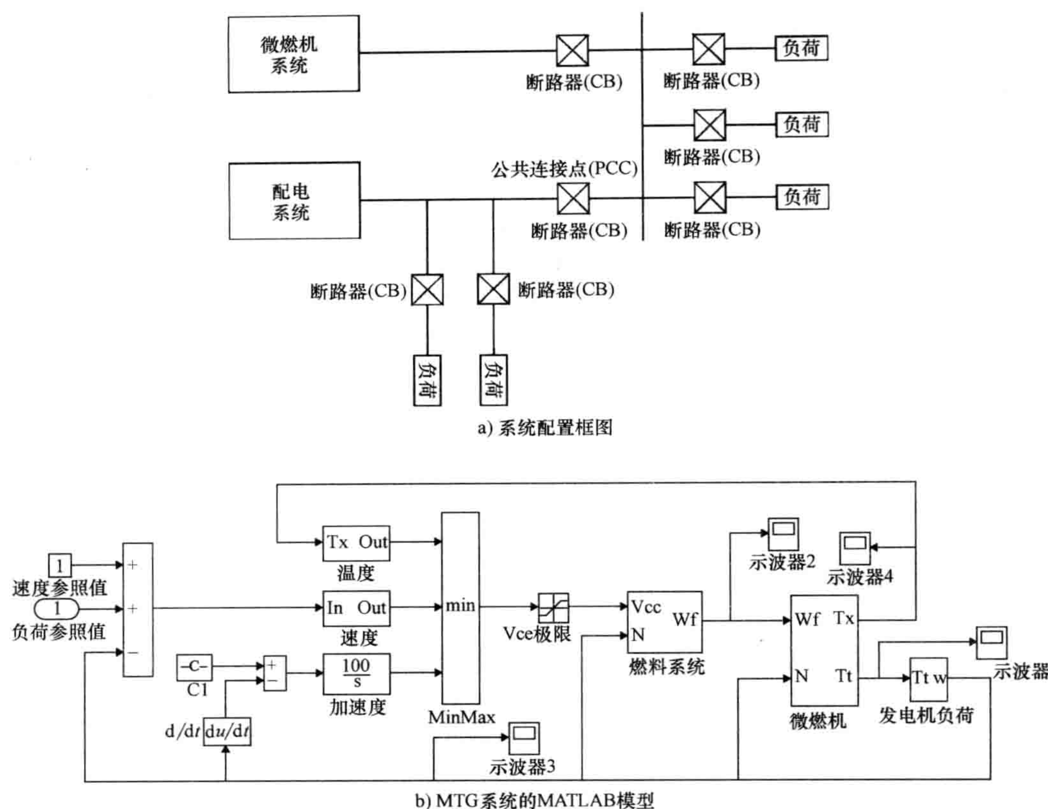


图 A-3　燃气轮机模型

主电网由 11kV 配电网模型代表，这个模型使用一个带有 5kW 负荷，短路水平 500kV · A 的 R-L 等效电源。电网通过一个 200kV · A、三相、60Hz、11/0.440kV、Y-△联结的变压器集成到 MT 内，耦合到 MT 的交流发电机用 MATLAB Simulink 同步电机模块来建模。主电网和 MTG 的互联如图 A-4a 所示。MTG 既可以供应自身负荷，也可以与电网同步运行。MTG 可以通过开合公共连接点（PCC）处的断路器（CB）与主网断开或连接。图 A-4b 示出了 MTG 系统的 MATLAB 模型。



a) 系统配置框图

b) MTG系统的MATLAB模型

图 A-4

A. 2 模型参数

用于 MT、交流发电机和电网的仿真参数基于之前提到的报告，并在表 A-1 ~ 表 A-3 中分别列出。

表 A-1 微型燃气轮机参数

参　数	值	参　数	值
额定功率(P_{rate})	150kV · A	燃料系统延迟时间常数 2(T_2)	0. 1s
有功功率参考值(P_{ref})	1. 0	最大负荷时间常数(T_3)	3. 0s
比例增益(K_p)	0. 1	最大负荷(L_{max})	1. 2
积分增益(K_i)	1. 0	阀位最大值(V_{max})	1. 2
燃气轮机阻尼系数(D_{tur})	0. 03	阀位最小值(V_{min})	0. 1
燃料系统延迟时间常数 1(T_1)	10. 0s	温度控制回路增益(K_T)	1. 0

表 A-2 交流发电机参数

参数	值	参数	值
额定功率(P_{rate})	150kV · A	阻尼因子(K_D)	60p. u
额定电压(V_{rate})	440V	惯性常数(H)	0. 822s
频率(f)	60Hz	内电阻(R)	0. 02p. u
极数(p)	2	内电抗(X)	0. 3p. u

表 A-3 电网参数

参数	值	参数	值
三相电源基准电压	11kV	频率	60Hz
三相电源 S. C. 水平	500kV · A	配电变压器一次电压	11kV
三相电源 X/R 比	6	配电变压器二次电压	440V
配电变压器标称功率	200kV · A		

A. 3 案例研究

以下案例都已经在 MATLAB Simulink 环境中进行了仿真。每个案例的总仿真时间在独立运行模式下是 300s，在并网模式下是 500s。输出功率和负荷以 150kV · A 为基准功率的标幺值表示。响应速度也以 3600r/min 为基准速度的标幺值来表示。

A. 3. 1 独立运行模式

A. 3. 1. 1 案例 1

在本案例中，独立运行的 MTG 系统初始带一个 30kW（0. 2p. u.）的负荷接到发电机母线上运行达到 t = 150s。另一个 90kW（0. 6p. u.）的阶跃负荷在 t = 150s 时接入。MTG 系统上的负荷变化如图 A-5 所示。

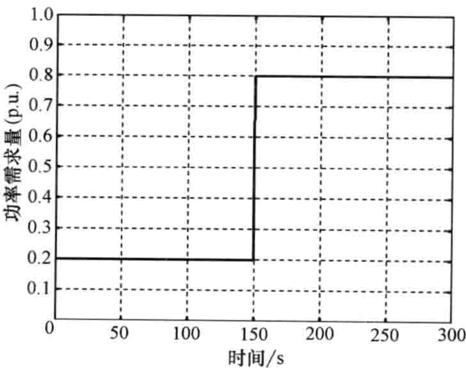
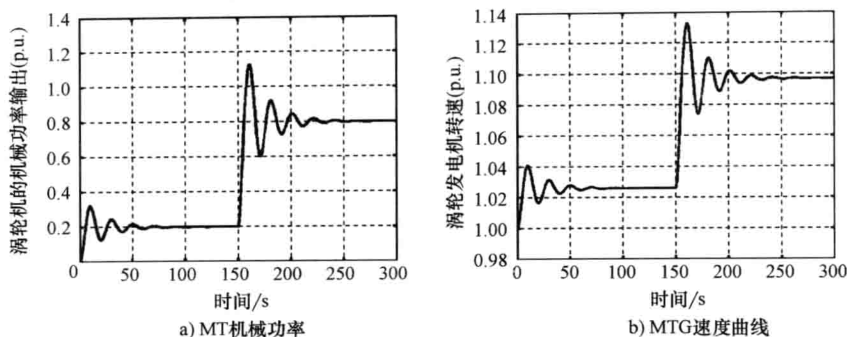


图 A-5 MTG 系统上的负荷

图 A-6a 给出了 MT 的机械功率输出。可以观察到 MT 的功率输出用了约 90s 的时间来匹配负荷需求。图 A-6b 给出了 MTG 速度曲线，在接入新负荷时 MTG 系统用几乎相同的时间达到新的稳定转速。

发电机的电功率输出如图 A-7 所示，看起来和负荷需求的阶跃变化紧密相符。



a) MT机械功率　　b) MTG速度曲线

图 A-6　MT 机械功率及 MTG 速度曲线

A.3.1.2　案例 2

在本案例中将转速控制并入独立运行的 MTG 系统中以维持转速常数在 1p. u. 。MTG 运行最初不带负荷。在时间 $t=50\text{s}$ 时，加入一个 0. 2p. u. 的负荷，在 $t=200\text{s}$ 时，加入另一个 0. 6p. u. 的负荷。图 A-8 中 MT 的机械功率输出曲线显示 MT 以大约 50s 的时间延迟跟踪负荷需求变化。

图 A-9 所示的发电机输出功率曲线显示与案例 1 中的负荷变化曲线紧密相符。图 A-10 所示的 MTG 转速曲线显示转速达到了 1p. u. ，并且在接入新负荷时维持了同样的转速。

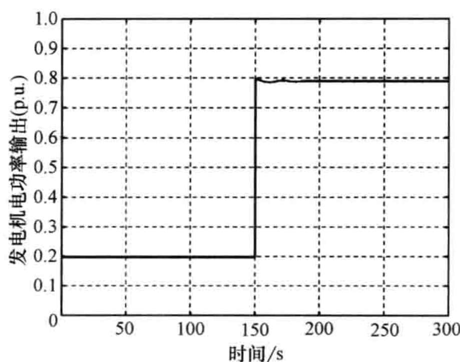


图 A-7　发电机电功率

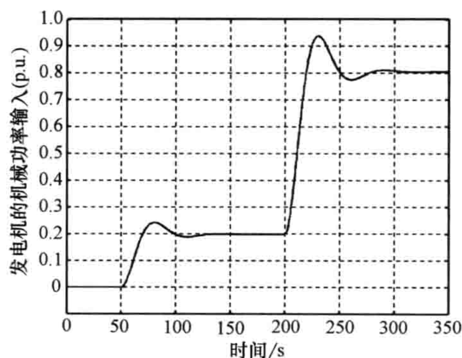


图 A-8　MT 机械功率

A.3.2　并网模式

A.3.2.1　案例 1

在这个模式下，MTG 系统并网运行。最初，MTG 系统和电网都不带负荷各自运行。在 $t=5\text{s}$ 时，0. 2p. u. 和 160kW（1. 07p. u.）的负荷分别加到 MTG 系统和电网上。在 $t=125\text{s}$ 时，再加一个 0. 6p. u. 的负荷到 MTG 上。在 $t=250\text{s}$ 时，MTG 和

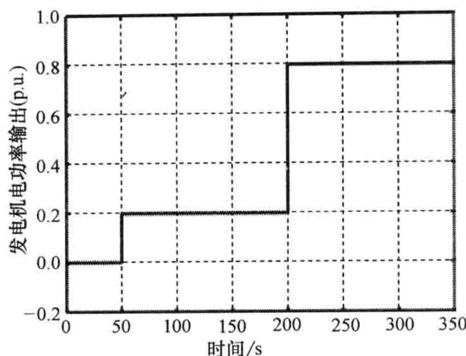


图 A-9 发电机功率

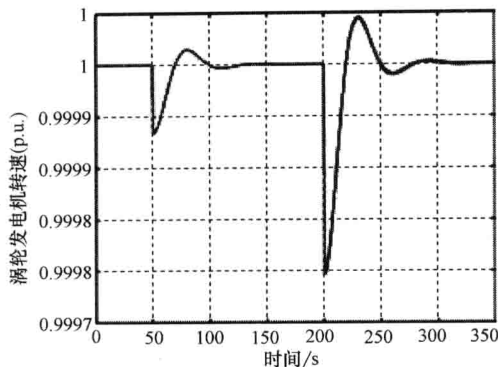


图 A-10 MTG 转速曲线

电网进行互连并在 $t=375\mathrm{s}$ 时与主网断开。MT 的机械功率输出曲线和发电机的电功率输出曲线分别如图 A-11 和图 A-12 所示。

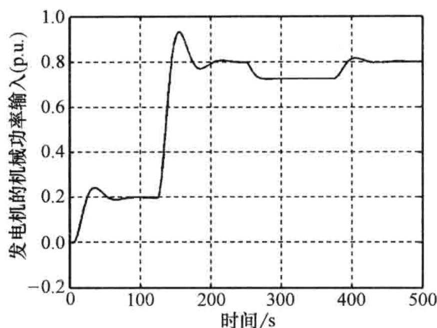


图 A-11 MT 机械功率

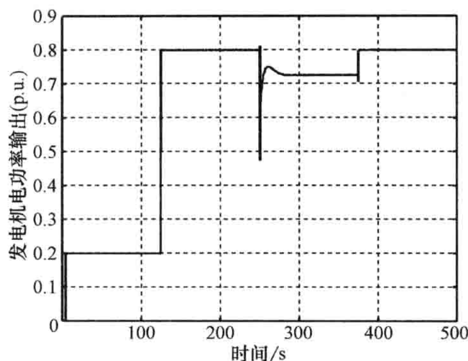


图 A-12 发电机电功率

系统的响应表明并网模式下当 $t=250\mathrm{s}$ 到 $t=375\mathrm{s}$ 时，由于电网的支撑，MTG 上的负荷减少到了一定程度。在独立运行模式下，MTG 带动了整个 0.8p. u. 的负荷。图 A-13 表明并网模式下在 $t=250\mathrm{s}$ 时，发电机电压从 1p. u. 开始下降，但又在 1p. u. 稳定下来。同样，在没有并网的情况下，发电机电压短暂升高到 1p. u. 以上，但之后又稳定到了 1p. u. 。图 A-14 示出的 MTG 转速变化曲线表明，转速在加载负荷以及并网、解列之后稳定到了 1p. u. 。

电网功率曲线如图 A-15 所示，当 MTG 在 $t=250\mathrm{s}$ 并网时，电网从 MTG 处共享了 12kW（0. 08p. u. ）的负荷。这个现象也可以从图 A-11 和图 A. 12 看出：MT 的机械功率和发电机的电功率都同样分别减少了 0. 08p. u. 。在 $t=375\mathrm{s}$ MTG 与电网断开时，共享的负荷又重新转移到 MTG。

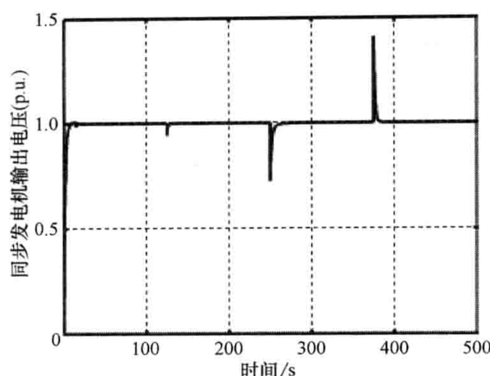


图 A-13　发电机电压

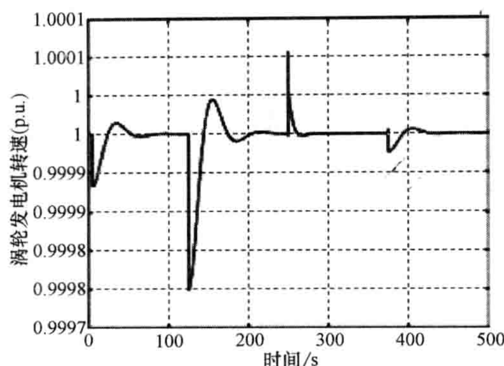


图 A-14　MTG 转速

A.3.2.2　案例 2

在本案例中，MTG 并网时，其负荷是变化的。开始时，MTG 系统和电网都各自不带负荷运行。在 $t=5$s 时，0.2p.u. 和 160kW（1.07p.u.）的负荷分别相应加到 MTG 和电网上；在 $t=100$s 时，MTG 系统和电网进行互联；接着，在 $t=150$s 时，另一个 0.6p.u. 的负荷加到 MTG 上。MT 的机械功率输出、发电机的电功率输出以及电网的功率分别如图 A-16～图 A-18 所示。

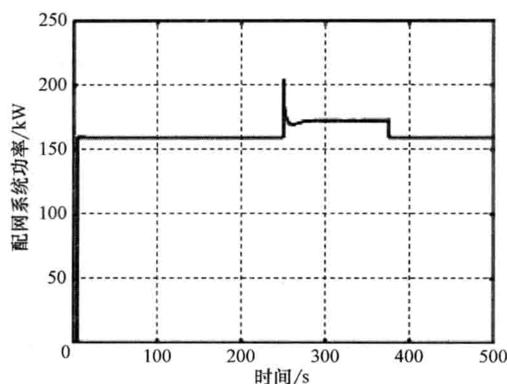


图 A-15　电网功率

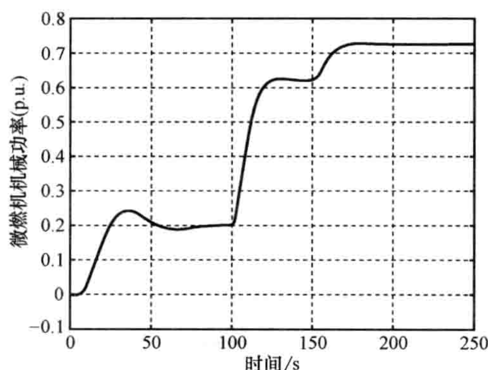


图 A-16　MT 机械功率

图 A-16 所示的 MT 机械功率变化曲线表明：它有效地响应了功率需求。当 $t=100$s 连接到电网时，它还分担了一部分电网的功率。MT 的机械功率也随着功率需求的增加而增加。可以看到，MT 供应了 0.7623p.u. 的负荷，剩下的由电网供应。图 A-17 显示出发电机的电功率和 MT 机械功率有着同样的变化趋势。图 A-18 的电网功率曲线说明电网功率在电网与 MTG 系统连接时会下降，因为它们互相承担对方的负荷。但是，在 $t=150$s 时，随着 MTG 系统负荷增加，电网分担了一部分 MTG 的功率需求。

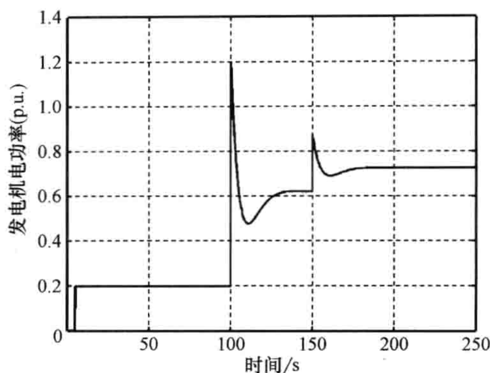


图 A-17 发电机电功率

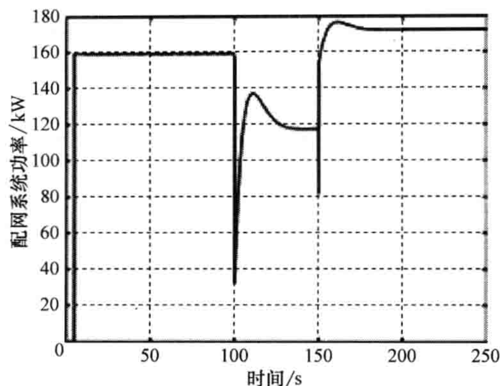


图 A-18 配电网功率

A.3.2.3 案例 3

在本案例中，MTG 并网时，其负荷是变化的。最初，MTG 系统和电网都各自不带负荷运行。在 t = 5s 时，0.5p.u. 和 160kW（1.07p.u.）的负荷分别相应加到 MTG 系统和电网上。在 t = 100s 时，MTG 系统和电网互联；接着，在 t = 150s 时，另一个 40kW（0.2667p.u.）的负荷加到电网上。MT 的机械功率输出、发电机的电功率输出以及电网的功率分别如图 A-19 ~ 图 A-21 所示。

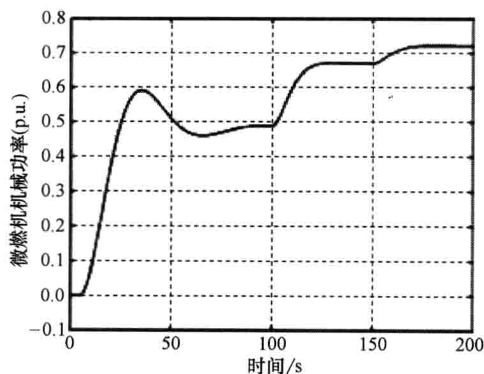


图 A-19 MT 机械功率

图 A-19 所示的 MT 机械功率变化曲线表明：它有效地响应了功率需求。当 t = 100s 连接到电网时，它还分担了一部分电网的功率。MT 的机械功率随着电网上功

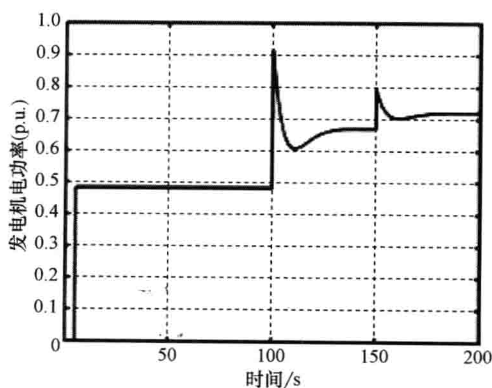


图 A-20 发电机电功率

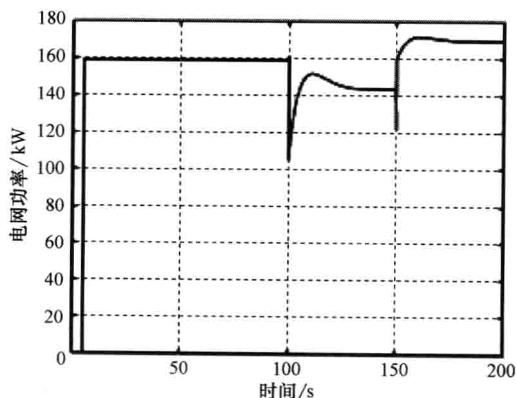


图 A-21 电网功率

率需求的增加而增加。可以看出，MT 供应了 0.7213p.u. 的负荷，因为它将一部分负荷分给了电网。图 A-20 显示出发电机的电功率随着 MT 机械功率变化。图 A-21 的电网功率曲线说明了在电网与 MTG 系统连接时电网功率会下降。然而，在 $t=150s$ 时，随着 MTG 系统负荷增加，电网分担了一部分 MTG 的功率需求。

A.3.3 MTG 性能

为了进行性能分析，MTG 在不同负荷条件下进行模拟仿真。表 A-4 给出了 MTG 在不同负荷条件下从仿真结果获得的不含机组转速控制和独立运行模式下的运行参数，即发电机的电压、电流，燃气轮机的转矩和转速。

表 A-4 发电机负荷和运行参数

负荷 /kW	电压/V	电流/A	燃气轮机转矩(p.u.)	MTG 转速(p.u.)
15	440.05	19.68	0.0998	1.01
30	440.05	39.36	0.1998	1.02
45	440.05	59.04	0.2998	1.03
60	439.99	78.73	0.3997	1.05
75	440.01	98.41	0.4996	1.06
90	439.97	118.10	0.6004	1.07
105	439.98	137.78	0.6998	1.08
120	439.99	157.46	0.8003	1.09
135	440.03	177.14	0.8996	1.10
150	440.01	196.82	0.9997	1.17

附录 B 双馈感应发电机风能转换系统的动态建模与性能分析

符号清单

符号	含义
$V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}$	d-q 轴电压
$i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$	d-q 轴电流
φ	磁链，磁通匝链数
ω_b	基电频率
ω	参考系的角速度
ω_r	转子角频率
T_{em}	电磁转矩
T_{mech}	外加机械转矩
T_{damp}	阻尼转矩

（续）

H	惯性常数
r	电阻
x	电抗
d	d 轴下标
q	q 轴下标
s,r	分别表示定子和转子
l,m	分别表示漏磁和励磁

B.1 模型说明

本节描述了一个基于风能转换系统（WECS）750W 变速双馈感应发电机（DFIG）的集成动态模型，并用 MATLAB Simulink 为气流、转子、齿轮和变速双馈感应发电机（DFIG）分别建立了数学模型。这个风能转换系统（WECS）模型也是用实际数据验证过的，该模型对于在任何给定的风况下选择一个合适的风能转换系统（WECS）是很有用的。

一个典型的风能转换系统（WECS）如图 B-1 所示。不同模型的中间输出和拟建的风能转换系统（WECS）全部电力输出都将呈现于这个附录里。

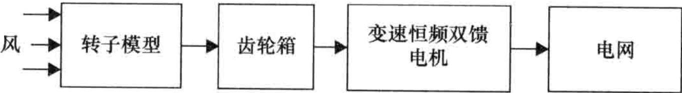


图 B-1 WECS 框图

考虑到实际、真正的风电厂配置情况（电子组件、发电机、保护系统等），为了能够安装到这些实际的系统中，开发的解决方案必须是简单、有效并且稳定的。因此，此建模方法基于以下目标：

（1）为了计算有功和无功发电能力，进行 750W 的变速双馈感应发电机（DFIG）的动态性能分析。

（2）为变速双馈感应发电机（DFIG）开发精确的数学模型，并用实际数据验证该模型。

（3）在开发好并且验证过的模型上实施设计的控制规则，并分析它们的动态特性。

（4）根据实际发电机及其优缺点来配置模型。

B.1.1 风速模型

风速由阶跃输入信号在一定时间内的采样结果合成。风的信号用 Simulink 内标准的阶跃信号块来表示，每个阶跃信号块被分配为风速的时间和振幅，这些阶跃信号被输入到一个求和模块中来产生在一定时间内的风速。风速发生器的模型如图

B-2 所示，其生成的，用于测试的风速信号曲线的时间周期是 25s，如图 B-3 所示。

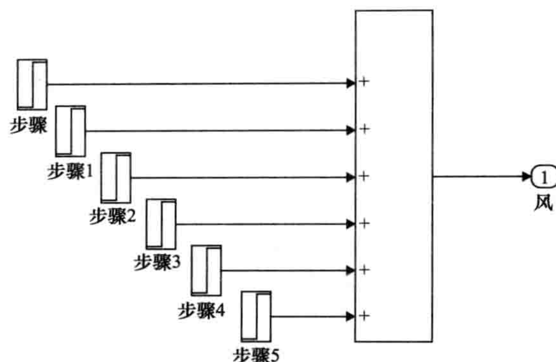


图 B-2 风速模型

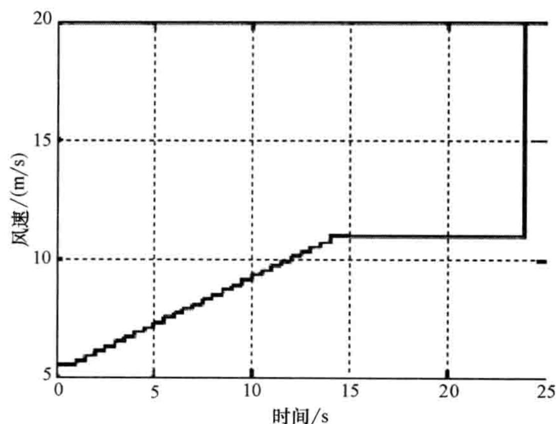


图 B-3 合成风速曲线

风机的可用总功率与输入的风流动能成比例。风的总功率是和风速的三次方成正比的，由下面公式给出：

$$P_W = \frac{1}{2}\rho A V^3 \tag{B-1}$$

式中，P_W是功率，单位是 W；A 是风轮扫掠面积，单位是 m^2；ρ 是空气密度，单位是 kg/m^3；V 是风速，单位是 m/s。

气动升力和阻力在风机转子的叶片上产生的转矩，由下面公式给出：

$$T_{rot} = \frac{P_{aero}}{\omega_{rot}} = T_L \tag{B-2}$$

式中，P_{aero}是转子主轴的气动功率；ω_{rot}是转子的角频率；T_L是低速轴转矩。

风的可用气动功率可由以下公式进行计算：

$$P_{aero} = C_P P_W \tag{B-3}$$

式中，C_P为风能利用系数。

图 B-4 给出了转子模型输出曲线。

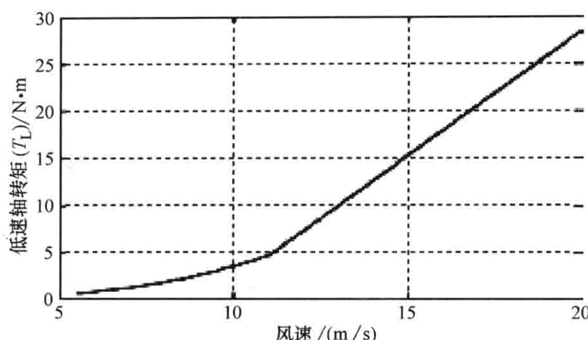


图 B-4 低速轴转矩曲线

B.1.2 齿轮传动模型

齿轮传动模型如图 B-5 所示。将气动转矩输入模型，这个转矩是低速轴转矩 T_L，通过齿轮箱转换成高速轴转矩 T_H。假定齿轮箱内损耗为零，则齿轮箱理想地从低速传送到高速：

$$T_H = \frac{T_L}{\eta_{gear}} \tag{B-4}$$

式中，η_{gear}为齿轮传动比。

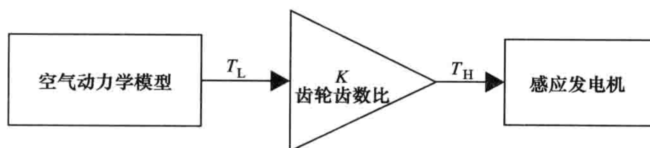


图 B-5 齿轮传动模型

图 B-6 是模型的一个示例输出。

B.1.3 双馈感应发电机模型

选定绕线转子式双馈感应发电机（DFIG）模型为研究对象，因为它的转子侧和定子侧都相当稳定并且容易控制。在不同的风速下建立双馈感应发电机的模型时，考虑这种绕线转子发电机必须从定子和转子两侧接入电源比较重要。正常情况下，定子直接连接到电网，转子侧通过一个变频电源转换器连接。为了覆盖一个从次同步到超同步速度的宽运行范围，转子侧的电源转换器需要在功率双向流动下工作。

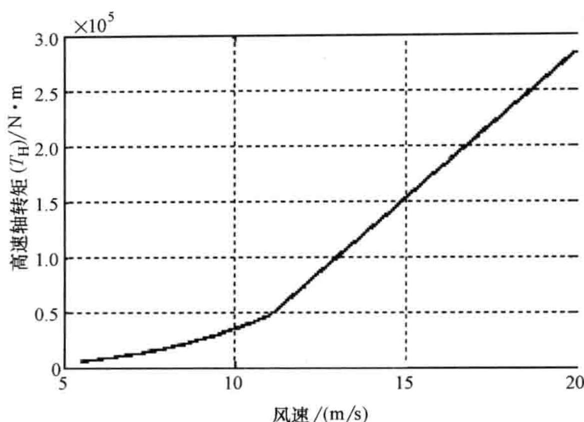


图 B-6 高速轴转矩曲线

B.1.3.1 双馈感应发电机 *d*-*q* 模型

感应发电机的 d-q 轴表示法用于以磁链作为基本变量的模拟仿真。它基于五阶二维表示法，通常称为“Park 模型”。这种方法用一个等效的两相电机代表一个三相电机，它的 d^s-q^s对应定子的 d 轴和 q 轴，d^r-q^r对应转子的 d 轴和 q 轴。一个同步旋转的 $d-q$ 参考坐标系用沿着定子磁链位置的方向来表示 d 轴。用这样的方式来获得电磁转矩和转子励磁电流之间的解耦控制。参考坐标系与定子电压以相同的速度旋转。在建立双馈感应发电机模型时，按照发电机的约定，电流为输出量，当功率输入电网时为负。

B.1.3.2 坐标变换

$d-q$ 模型要求所有的三相变量必须转换到两相同步旋转坐标系下。三相对称感应电机的 as-bs-cs 固定轴可以认为被 $2\pi/3$ 角分割。这里的三相静止坐标系（d^s-q^s）中的变量被转换到同步旋转参考坐标系（d^e-q^e）中。假设 d^s-q^s轴以角度 θ 定向，电压 V_{ds}^s和 V_{qs}^s可以分解成 as-bs-cs 分量，而且可以用以下矩阵形式表示：

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos(\theta-120) & \sin(\theta-120) & 1 \\ \cos(\theta+120) & \sin(\theta+120) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{0s}^s \end{bmatrix} \tag{B-5}$$

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{0s}^s \end{bmatrix} = \left(\frac{2}{3}\right) \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120) & \cos(\theta+120) \\ \sin\theta & \sin(\theta-120) & \sin(\theta+120) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \tag{B-6}$$

式中增加 V_{0s}^{s} 为零序分量，但其可能是不存在的。式（B-6）表示从三相量转换成两相（d-q）量，电流和磁链也可以用类似的式子进行转换。

发电机在旋转坐标系中的主要变量为状态矢量空间形式的磁链 φ_{qs}、φ_{ds}、φ'_{qr} 和 φ'_{dr}，由下列式子给出：

$$\varphi_{qs} = \omega_b \int \left[V_{qs} - \left(\frac{\omega_r}{\omega_b \varphi_{ds}} \right) + \frac{(r_s / x_{ls})}{\varphi_{mq} - \varphi_{qs}} \right] \tag{B-7}$$

$$\varphi_{ds} = \omega_b \int \left[V_{ds} - \left(\frac{\omega_r}{\omega_b \varphi_{qs}} \right) + \frac{(r_s / x_{ls})}{\varphi_{md} - \varphi_{ds}} \right] \tag{B-8}$$

$$\varphi'_{qr} = \omega_b \int \frac{r' r / x_{lr}}{\varphi_{mq} - \varphi'_{qr}} \tag{B-9}$$

$$\varphi'_{dr} = \omega_b \int \frac{r' r / x_{lr}}{\varphi_{md} - \varphi'_{dr}} \tag{B-10}$$

将 $\omega = \omega_r$ 和 $V_{qr} = V_{dr} = 0$ 代入式（B-7）~式（B-10）中进行计算，可得电流：

$$i_{qs} = \frac{\varphi_{qs} - \varphi_{mq}}{x_{ls}} \tag{B-11}$$

$$i_{ds} = \frac{\varphi_{ds} - \varphi_{md}}{x_{ls}} \tag{B-12}$$

$$i'_{qr} = \frac{\varphi'_{qr} - \varphi_{mq}}{x'_{lr}} \tag{B-13}$$

$$i'_{dr} = \frac{\varphi'_{dr} - \varphi_{md}}{x'_{lr}} \tag{B-14}$$

求解式（B-11）~式（B-14）可以得到 φ_{mq} 和 φ_{md}，如下所示：

$$\varphi_{mq} = x_m \left(\frac{\varphi_{qs}}{x_{ls}} + \frac{\varphi'_{qr}}{x'_{lr}} \right) \tag{B-15}$$

$$\varphi_{md} = x_m \left(\frac{\varphi_{ds}}{x_{ls}} + \frac{\varphi'_{dr}}{x'_{lr}} \right) \tag{B-16}$$

式中，$x_m = 1/(1/x_m + 1/x_{ls} + 1/x_{lr})$。

感应发电机的电磁转矩（N·m）以 d-q 轴的磁链和电流表示如下：

$$T_{em} = \left(\frac{3p}{4\omega_b} \right) (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \tag{B-17}$$

通过将惯性转矩等化为加速度转矩，得到控制转子运动的方程式：

$$J\left(\frac{d\omega_{rm}}{dt} \right) = T_{em} + T_{mech} - T_{damp} \tag{B-18}$$

若表示为标幺值，则式（B-18）变为

$$\frac{2H\mathrm{d}(\omega_r/\omega_b)}{\mathrm{d}t}=T_{em}+T_{mech}-T_{damp} \tag{B-19}$$

在式（B-17）和式（B-19）中，磁链是两相 d-q 轴旋转参考系下的。为了得到三相的输出结果，必须把两相 d-q 轴的量纲转换到三相静止参考系下。可以通过以下步骤得到。

1. Zero-n 变换

对于中性点不接地系统，通过用零序电压获得相电压。其转换可以用矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix}V_{an}\\V_{bn}\\V_{cn}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}2/3 & -1/3 & -1/3\\-1/3 & 2/3 & -1/3\\-1/3 & -1/3 & 2/3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V_{a0}\\V_{b0}\\V_{c0}\end{bmatrix} \tag{B-20}$$

2. 单位向量计算

单位向量 $\cos\theta_e$ 和 $\sin\theta_e$ 常用于矢量旋转“*abc*-*dq* 变换”和“*dq*-*abc* 变换”中。角度 θ_e 通过三相输入电压的频率 ω_e 积分直接计算。只需通过 θ_e 的正弦和余弦就可以获得单位矢量。这有助于确定转子在 d-q 模型中的位置。

3. *abc*-*dq* 和 *dq*-*abc* 变换

使用 *abc*-*dq* 变换得到两相电压，由下式得出：

$$\begin{bmatrix}V_{qs}^{s}\\V_{ds}^{s}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\1 & -1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V_{an}\\V_{bn}\\V_{cn}\end{bmatrix} \tag{B-21}$$

使用 *dq*-*abc* 变换得到三相电流，由下式得出：

$$i_{qs}^{s}=V_{qs}\cos\theta_e+V_{ds}\sin\theta_e \tag{B-22}$$

$$i_{ds}^{s}=-V_{qs}\sin\theta_e+V_{ds}\cos\theta_e \tag{B-23}$$

$$\begin{bmatrix}i_a\\i_b\\i_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0\\-1/2 & -\sqrt{3}/2\\-1/2 & -\sqrt{3}/2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{qs}^{s}\\i_{ds}^{s}\end{bmatrix} \tag{B-24}$$

式（B-5）~式（B-24）借助 MATLAB 中的 M 文件来表示。磁链状态方程式（B-7）~式（B-10）需要首先建模，因为其他变量的计算都需要用到磁链状态方程。为了实现中间控制，最好选择离散模块。加载于负载转矩上的变量 T_{em} 和 ω_r 的瞬态响应分别如图 B-7 和图 B-8 所示，从图中可以看出电磁转矩和速度在 0.25s 内达到稳定状态，之后这些值只有当感应发电机在峰值负荷模式下调整其速度运行时

才会改变。转矩出现负值表明发电机在发电模式下运行。

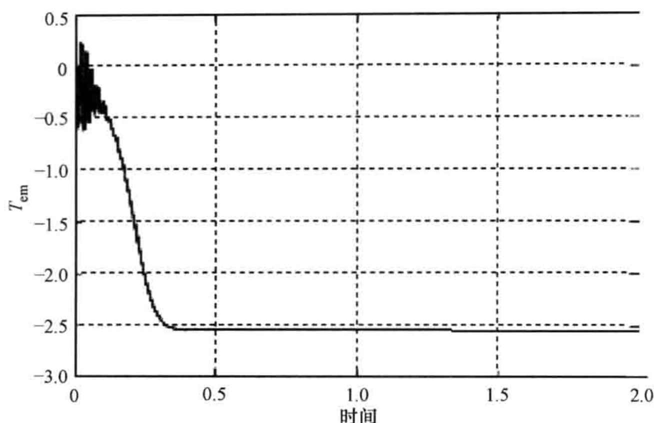


图 B-7 感应发电机的转矩变化曲线

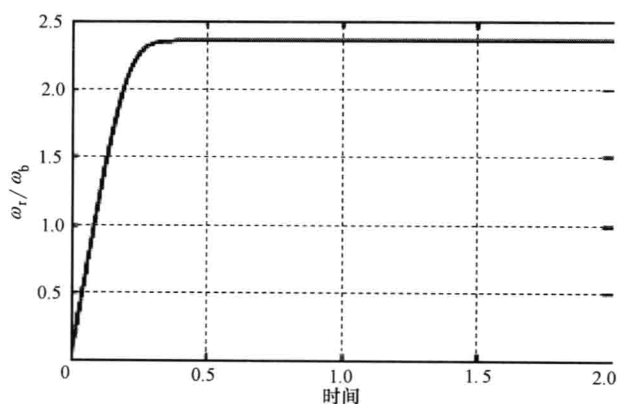


图 B-8 感应发电机 ω_r（p. u.）曲线

B.2 案例研究

使用典型的 WECS 进行案例研究，其技术参数在表 B-1 中给出。在样本风能输入情况下 WECS 的输出如图 B-9 所示。

风能转换系统（WECS）的动态模型在输入给定风速下得到合适的输出。该模型对于用户是方便的，它提供中间控制使得用户能查看每个独立模型的输出，同时也能提供转子、齿轮箱和感应发电机的参数改变方法。可以从风机的速度特性中看出电能的产生。

表 B-1 双馈感应发电机（DFIG）案例研究技术参数

参　　数	数值	参　　数	数值
极数	4	转子漏抗	2.616Ω
额定转速	1800r/min	转子惯量	0.1kg/m^2
额定电压	200V	切入风速	5.5m/s
额定输出功率	750W	额定风速	11m/s
定子绕组电阻	3.35Ω	切出风速	20m/s
定子漏抗	2.616Ω	齿轮传动比	0.001
折算到定子侧的转子电阻	1.99Ω		

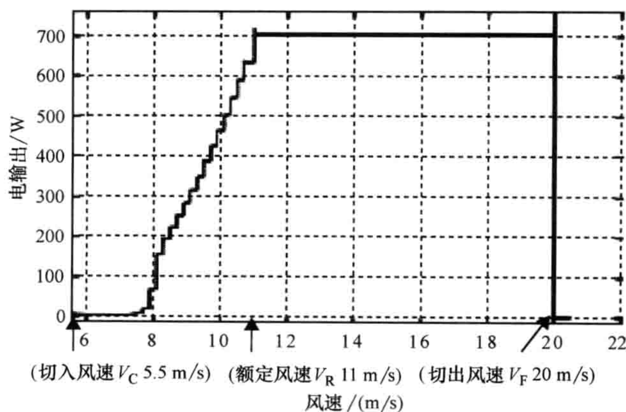


图 B-9 风力发电机的典型功率曲线

附录 C 质子交换膜燃料电池系统动态性能分析软件仿真

C.1 PEMFC 发电系统

本节描述了两个用于质子交换膜燃料电池（PEMFC）动态性能分析的动态模型。第一个模型使用 PI 控制器控制燃料流向燃料电池系统的重整装置，第二个模型使用模糊逻辑控制器。使用一个阶跃负载变化研究 PEMFC 系统的动态特性，并且对两种模型的输出进行比较。

PEMFC 发电系统有三个主要的部分：

（1）燃料处理器。

（2）电源部分。

（3）功率调节单元。

燃料处理器将燃料转换为氢气和其他气体。电源部分通过使用多个燃料电池进行发电。PCU（功率调节单元）将发出的直流电转换为交流电，通过电流、电压和频率控制以输出满足要求的电能。

C.2 PEMFC 动态模型

PEMFC 动态模型如图 C-1 所示。

以下是用于建模的一些假设：

（1）适用于能斯特方程。

（2）气体是理想的。

（3）PEMFC 加入氢气和氧气。

（4）PEMFC 温度稳定。

（5）电极的通道足够小，可以忽略穿过它们的压降。

（6）电极通道内外两侧的压强比足够大，能够起到扼流作用。

（7）考虑欧姆损失和活化损失。

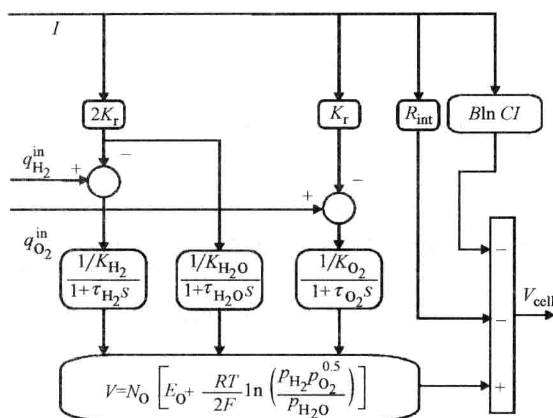


图 C-1　PEMFC 模型

PEMFC 内部发生的反应式为



$$H_2+\frac{1}{2}O_2\rightarrow H_2O \tag{C-1}$$

使用能斯特方程和欧姆定律计算阴极和阳极的电动势差为

$$V=N_0\left[E_0+\frac{RT}{2F}\left(\ln\frac{p_{H_2}p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}}\right)\right]-rI-B\ln CI \tag{C-2}$$

使用理想气体定律来计算气体流过电极的分压。这个公式适用于所有的气体。因此，氢气的表达式如下：

$$p_{H_2}V_{an}=n_{H_2}RT \tag{C-3}$$

式中，p_{H_2}表示氢气的分压；T表示温度；V_{an}表示阳极通道的体积；n_{H_2}表示通道中氢气的摩尔数；R是理想气体常数。

通过阀门的气流量与其分压成正比，其关系可以表示为

$$\frac{q_{H_2}}{p_{H_2}}=\frac{k_{an}}{\sqrt{M_{H_2}}}=k_{H_2} \tag{C-4}$$

和

$$\frac{q_{H_2O}}{p_{H_2O}}=\frac{k_{an}}{\sqrt{M_{H_2O}}}=k_{H_2O} \tag{C-5}$$

式中，q_{H_2}为氢气的摩尔流量（kmol/s）；q_{H_2O}为水的摩尔流量（kmol/s）；p_{H_2}为氢气的分压（atm）；p_{H_2O}为水的分压（atm）；k_{H_2}为氢气阀的摩尔常量（kmol/atm/s）；k_{H_2O}为水阀摩尔常量（kmol/atm/s）；k_{an}为阳极阀的摩尔常量（kmol-kg$^{0.5}$/atm/s）；M_{H_2}为氢气的摩尔质量（kg/kmol）；M_{H_2O}为氧气的摩尔质量（kg/kmol）。

对于氢气，常用理想气体方程对其分压求导：

$$\frac{d}{dt}p_{H_2}=\frac{RT}{V_{an}}(q_{H_2}^{in}-q_{H_2}^{out}-q_{H_2}^{r}) \tag{C-6}$$

式中，R是理想气体常量（1 atm/ kmol/K）；T是绝对温度（K）；$q_{H_2}^{r}$是反应的氢气流量（kmol/s）；$q_{H_2}^{in}$是输入的氢气流量（kmol/s）；$q_{H_2}^{out}$是输出的氢气流量（kmol/s）。

氢气流量和电池堆电流的关系可以写成

$$q_{H_2}^{r}=\frac{N_0I}{2F}=2K_rI \tag{C-7}$$

式中，N_0是串联电池堆中燃料电池的数目；I是电池堆电流（A）；F是法拉第常量（C/kmol）；K_r是模型常量（kmol/s/A）。

使用氢气流量方程，S域的氢气分压导数可以表示为

$$p_{H_2}=\frac{1/K_{H_2}}{1+\tau_{H_2}s}(q_{H_2}^{in}-2K_rI) \tag{C-8}$$

水和氧气的分压可以使用和氢气相同的分压表达式进行计算。

极化曲线可以表示为

$$V_{cell}=V+\eta_{act}+\eta_{ohmic} \tag{C-9}$$

式中，η_{act}是氧气浓度、二氧化碳及电池堆电流I（A）的函数；η_{ohmic}是电池堆电流和电池堆内阻$R_{int}(\Omega)$的函数。

V_{cell}可以通过假设温度及氧气浓度恒定改写成：

$$V_{cell} = V - B\ln(CI) - R_{int}I \tag{C-10}$$

式中，B 和 C 都是常数。

能斯特电压可以表示为

$$V = N_O\left[E_O + \frac{RT}{2F}\left(\ln\frac{p_{H_2}p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}}\right)\right] \tag{C-11}$$

C.3 重整装置模型

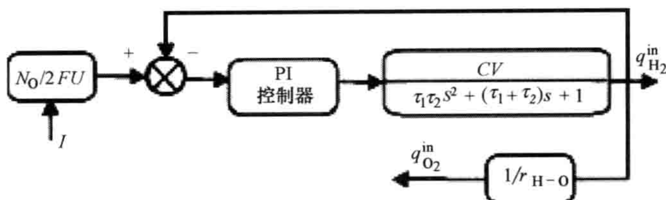


图 C-2　燃料转换器模型

重整装置模型可以由一个二阶传递函数表示，图 C-2 所示的数学模型可以表示为

$$q_{H_2} = q_{methane}\left[\frac{CV}{\tau_1\tau_2s^2 + (\tau_1 + \tau_2)s + 1}\right] \tag{C-12}$$

式中，$q_{methane}$是甲烷的流速；CV 是转换因子（每 kmol 的甲烷中含有多少 kmol 的氢气）；τ_1、τ_2是重整装置时间常数（s）；q_{H_2}是氢气流量（kmol/s）。

在重整装置模型中，来自电池堆电流的反馈将根据燃料电池的输出功率来控制氢气流量。控制器控制重整装置中甲烷的流速，氧气流速则由氢氧比（r_{H-O}）决定。

C.4 功率调节单元模型

图 C-3 中所示 PCU 将输出的直流电压转换为交流电压。它包括一个将直流输出电压升高到直流母线电压的 DC-DC 整流器和一个将直流母线电压转换为交流电压的 DC-AC 逆变器。



图 C-3　功率调节单元

这里使用的是一个简单的 DC-AC 逆变器模型，因为逆变器的动态时间常数是微秒级的或者最高是毫秒级的，重整装置和电池堆的时间常数是秒级的，因此是否

包含逆变器时间常数对于动态响应的准确性来说影响不大。假设逆变器交流输出电压为230V，和家用电压相同。

输出电压和功率可以表示为调制系数和相角的函数，表示如下：

$$V_{ac}=mV_{cell}\delta \tag{C-13}$$

$$P_{ac}=mV_{cell}V_{s}\frac{\sin\delta}{X_{s}} \tag{C-14}$$

$$I_{1}=\frac{P_{1}}{V\cos(\theta)} \tag{C-15}$$

$$I=mI_{1}\cos(\theta+\delta) \tag{C-16}$$

式中，V_{ac}是逆变器交流输出电压（V）；m 是逆变器调制系数；δ 是交流电压的相位角（rad）；P_{ac}是逆变器的交流输出功率（W）；V_{s}是负载端电压（V）；X_{s} 是线路电抗（Ω）；I_{1}是负载电流（A）；θ 是负载相角（rad）；P_{1}是负载功率（W）。

C.5 模型参数

该模型仿真了一个100kW 的 PEMFC 系统，如图 C-1 所示。这个模型用来研究输出电压与氢气、氧气及水分压之间的关系。总模型整合了 PEMFC、重整装置、电力调节单元三部分。这个模型的参数是基于400V 直流母线电压、72.46A 的电池堆电流以及0.8V 的电池电压。PEMFC 系统包含6个并联的电池堆，每个电池堆由550个单电池串联而成（见表 C-1）。

表 C-1 模型参数表

参数	值
电池堆温度(T)	343K
法拉第常数(F)	96484600C/kmol
通用气体常数(R)	8314.47J/kmol/K
空载电压(E_0)	0.8 V
每个电池堆的电池数目(N_0)	550
电池堆的数目(N_{stack})	6
K_r 常数 = $N_0/(4F)$	1.4251×10^{-6}kmol/s
利用系数(U)	0.8
氢气阀常数(K_{H_2})	4.22×10^{-5}kmol/s/atm
水阀常数(K_{H_2O})	7.716×10^{-6}kmol/s/atm
氧气阀常数(K_{O_2})	2.11×10^{-5}kmol/s/atm
氢气时间常数(τ_{H_2})	3.37 s
水时间常数(τ_{H_2O})	18.418 s
氧气时间常数(τ_{O_2})	6.74 s

（续）

参　　数	值
重整装置的时间常数（τ_1）	2s
重整装置的时间常数（τ_2）	2s
重整装置的 PI 增益（C_1）	0.25
转换因子（CV）	2
活化电压常数（B）	0.04777 A^{-1}
活化电压常数（C）	0.0136 V
内阻（R_{int}）	0.2778Ω
外部线路电抗（X）	0.05Ω
PI 增益常数（C_2）	0.1
PI 增益常数（C_3）	10
甲烷参考信号（$Q_{methref}$）	0.000015 kmol/s
氢气-氧气流量比率（r_{H-O}）	1.168
电流延迟时间常数（T_d）	3s

C.6 使用 PI 控制器的案例研究

为了测试带有 PI 控制器的燃料电池系统的性能，在 $t=50s$ 时加载一个 50～100kW 的阶跃负荷变化，仿真时间为 100s。图 C-4 所示为阶跃负荷变化曲线，图 C-5～图 C-11 给出了负荷变化对于电池堆电压、电池堆电流、逆变器调制系数、逆变器交流电压和相角 δ、逆变器交流功率输出和氢气流量的影响。

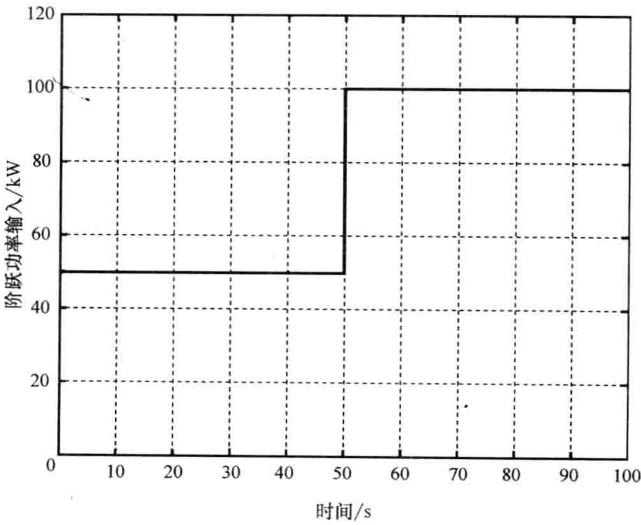


图 C-4　阶跃负荷变化曲线

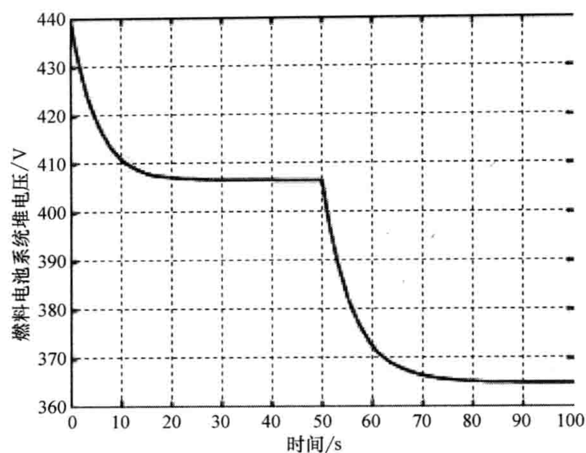


图 C-5 电池堆电压曲线（PI）

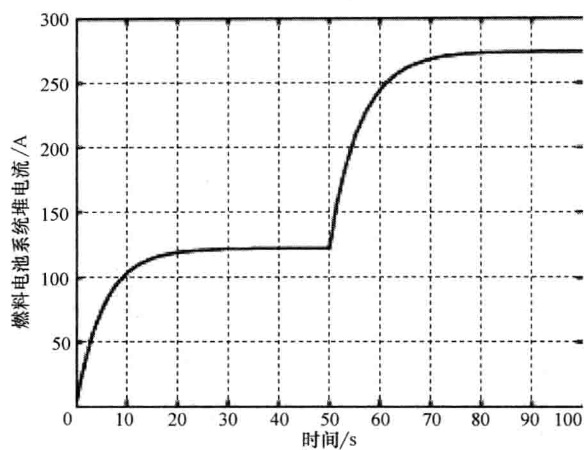


图 C-6 电池堆电流曲线（PI）

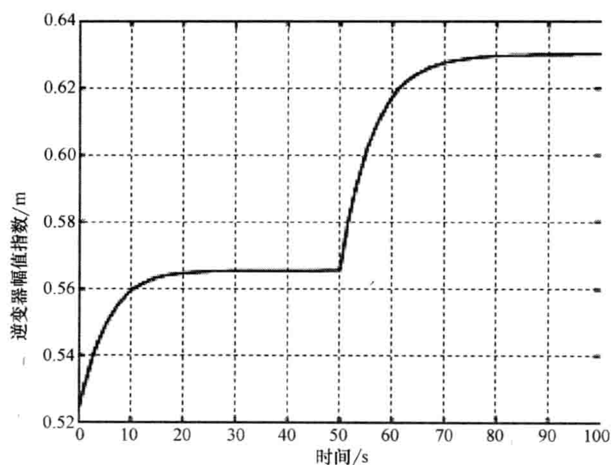


图 C-7 逆变器调制系数曲线（PI）

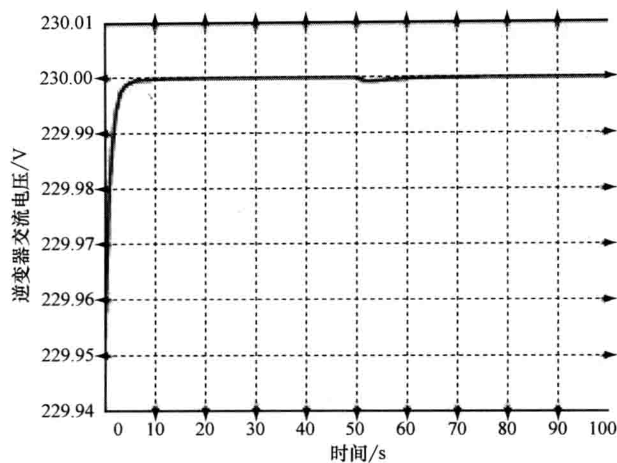


图 C-8 逆变器交流电压曲线（PI）

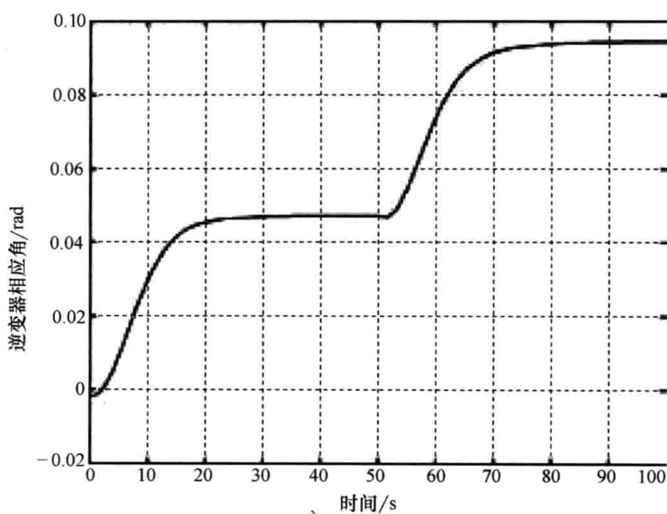


图 C-9 逆变器相角曲线（PI）

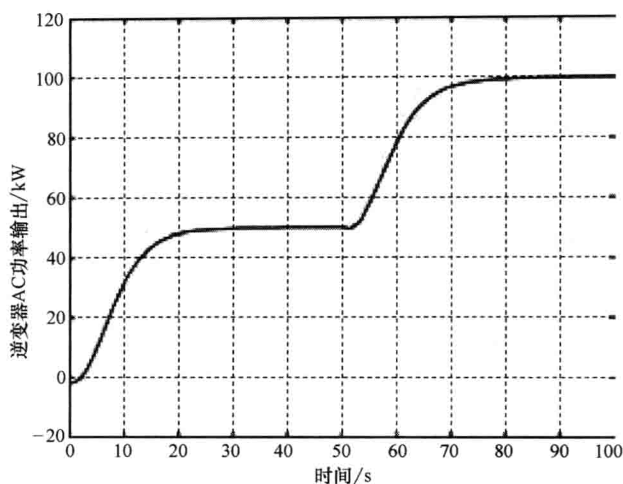


图 C-10 逆变器交流输出功率曲线（PI）

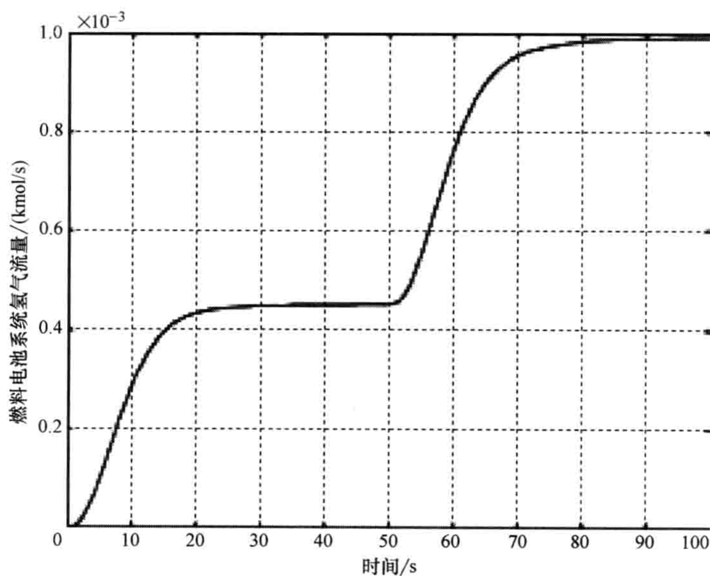


图 C-11 氢气流量曲线（PI）

C.7 模糊逻辑控制器设计

模糊逻辑控制器（FLC）的设计步骤如下：

(1) 模糊策略和编译器（模糊化器）。

(2) 数据库。

1）论域的离散化/规范化。

2）输入和输出区间的模糊划分。

3）完整性。

4）主要模糊集的隶属函数选择。

（3）规则库。

1）过程状态（输入）变量和控制（输出）变量的模糊控制规则选择。

2）模糊控制规则的来源和衍生。

3）模糊控制规则的类型。

4）模糊控制规则的一致性、交互性和完整性。

（4）模糊推理机制。

（5）去模糊策略和去模糊化编译器（去模糊化器）。

FLC 模块有两个输入：

1）误差。

2）误差变化率。

控制器的输出连接到重整装置作为输入，重整装置根据控制器输出将燃料转换为氢气。FLC 的每个输入和输出有 7 个隶属函数，对输入输出变量的模糊划分如图 C-12 所示。模糊变量由模糊语言变量来表示，如“正向大”、“正向居中”、“正向小”、“零”、“负向大”、“负向居中”、“负向小”。在这里，对于三变量隶属函数，使用的模糊语言定义是相同的。

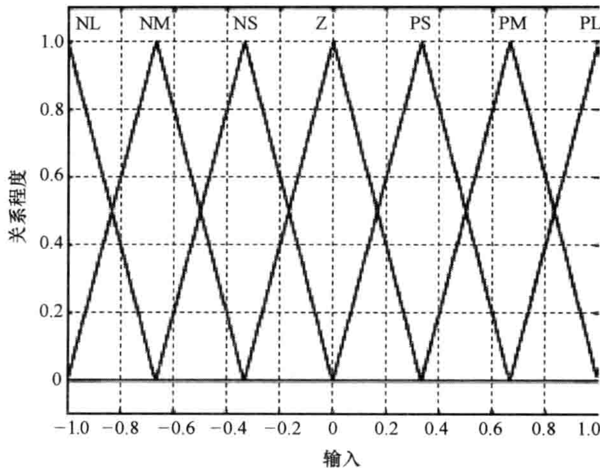


图 C-12 模糊化隶属函数曲线

C.7.1 模糊规则库

FLC 使用规则库来实现控制动作。本文使用的规则库见表 C-2。规则库中的一

条规则可以用这种形式表示：如果误差是 NL，误差变化率是 NL，那么输出也是 NL。这个 FLC 使用了 49 个类似这样的规则。

这里使用的推理方法是简易 MIN-MAX 方法。每条规则的输出隶属函数由 MIN 操作器给出，而总的隶属函数由 MAX 操作器给出。去模糊化面积重心法根据输出隶属函数重心确定输出值。

表 C-2 模糊规则库

		误差变化率						
		NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
误差	NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	Z
	NM	NL	NL	NL	NM	NS	Z	PS
	NS	NL	NM	NS	NS	Z	PS	PM
	Z	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
	PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PL
	PM	NS	Z	PS	PM	PM	PL	PL
	PL	Z	PS	PM	PL	PL	PL	PL

C.8 使用模糊控制器的案例研究

为了测试带有模糊控制器（FLC）的 PEMFC 系统的性能，在 $t=50\text{s}$ 时加载一个相同的 50～100kW 的阶跃负荷变化，仿真时间与之前一样为 100s。这类阶跃负荷变化带来的影响在 FLC 逆变器交流输出功率、交流电压、调制系数、相角以及氢气流量方面与 PI 控制器进行比较，其曲线如图 C-13～图 C-17 所示。

通过比较表明，FLC 在负荷跟踪函数上优于传统的 PI 控制器，同时也提高了 PEMFC 系统的性能。

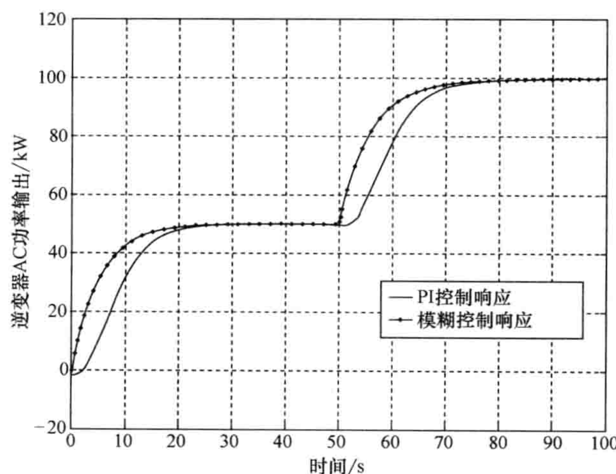


图 C-13 逆变器交流功率输出曲线（FLC）

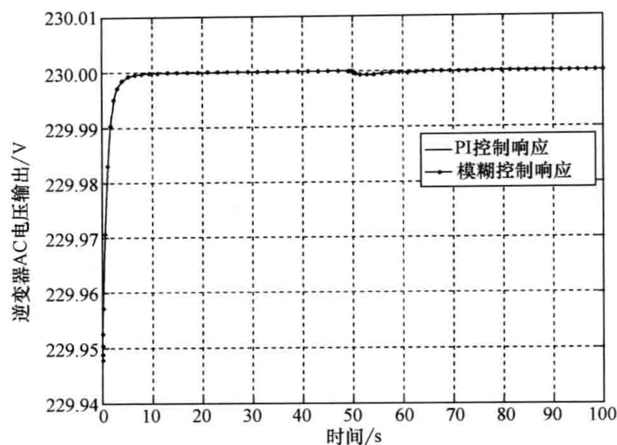


图 C-14 逆变器交流电压曲线（FLC）

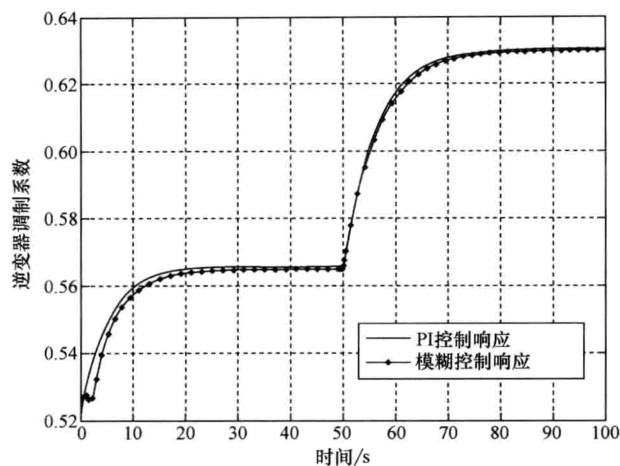


图 C-15 逆变器调制系数曲线（FLC）

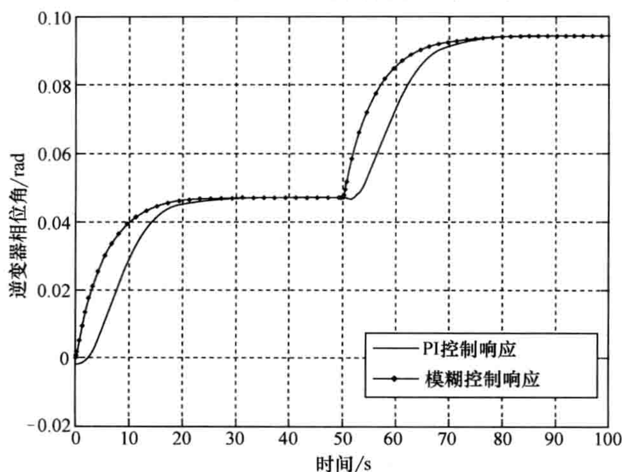


图 C-16 逆变器相位角曲线（FLC）

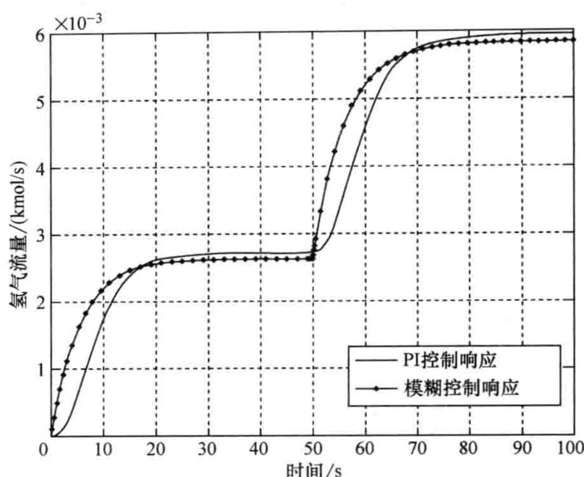


图 C-17 氢气流量曲线（FLC）

附录 D 固体氧化物燃料电池在分布式发电中的应用

D.1 SOFC 发电系统

本节介绍了 100kW 固体氧化物燃料电池（SOFC）发电系统的动态模型及其控制方法。该模型和控制方法适用于研究 SOFC 在分布式发电（DG）系统中的性能。SOFC 系统因其能够使用相对不纯的燃料，而被选作为分布式能源（DER）。它也可以运行在较高的温度条件下。该动态模型可以在独立或与其他分布式能源集成的模式下进行该系统的仿真与性能分析，从而预测其动态响应和负载跟踪特性。通过开发的控制有功功率及逆变器输出交流电压的策略，在负荷参数维持不变的情况下，该模型非常有效，并且能够提供良好的动态响应和负荷跟踪特性。本节提出的模型用于仿真从逆变侧控制器到 SOFC 逆变系统的功率需求的阶跃变化。该模型在 SOFC 系统内分别使用两个 PI 控制器，来实现根据功率需求控制燃料流量以及将母线电压维持在设定值不变。

燃料电池发电系统包含以下三个主要组成部分：

（1）燃料处理器。

（2）电源部分。

(3) 功率调节单元。

燃料处理器将燃料转换成氢气和其他气体副产品。电源部分使用一定数量的燃料电池发电。功率调节单元由 DC-DC 转换器构成，该转换器将发出的直流电变换成指定的直流输出，然后此直流再通过 DC-AC 逆变器转换成交流，并且通过电流、电压和频率控制使其满足既定的需要，如图 D-1 所示。

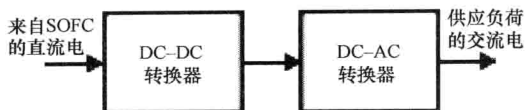


图 D-1 功率调节单元

D.2 SOFC 动态模型

建模的过程中作了如下假设：

(1) 适用于能斯特方程。

(2) 气体是理想的。

(3) 燃料电池使用的燃料为氢气，氧化剂为氧气。

(4) 电池温度稳定。

(5) 电极的通道足够小，可以忽略穿过它们的压降。

(6) 电极通道内外两侧的压强比足够大，能够起到扼流作用。

(7) 考虑欧姆损失，忽略活化损失。

SOFC 的模型基于某些附加的控制策略而得到一个修正后的模型，以便开展动态性能分析。PI 控制器被用来控制响应功率需求变化的氢气流量。这种控制策略以燃料电池堆的电压作为反馈。

在刚开始的时候，扼流方程 (D-1) 表示为

$$\frac{m_f}{p_{us}} = k\sqrt{M} \tag{D-1}$$

式中，m_f是质量流量；p_{us}为上游压强；k 是阀常数；m 是液体摩尔质量。

利用系数 (U_f) 被定义为与氧气反应的氢气量和进入阳极的氢气量的比值，表达式如下：

$$U_f = \frac{m_{f,H_2,r}}{m_{f,H_2,in}} \tag{D-2}$$

式中，U_f是利用系数；$m_{f,H_2,r}$是与氧离子发生反应的氢气量，$m_{f,H_2,in}$为进入阳极的氢气量。

考虑到通过阀的任何气体的摩尔流量正比于它的分压，可以推导出方程 (D-3) 和 (D-4)：

$$\frac{q_{H_2}}{p_{H_2}} = \frac{k_{an}}{\sqrt{M_{H_2}}} = K_{H_2} \tag{D-3}$$

$$\frac{q_{H_2O}}{p_{H_2O}} = \frac{K_{an}}{\sqrt{M_{H_2O}}} = K_{H_2O} \tag{D-4}$$

式中，q_{H_2}是氢气的摩尔流量；q_{H_2O}是水的摩尔流量；p_{H_2}是氢气的分压；p_{H_2O}是水的分压；k_{an}是阳极阀常数；M_{H_2}是氢气的摩尔质量；M_{H_2O}是水的摩尔质量；K_{H_2}是氢气的阀摩尔常数，K_{H_2O}是水的阀摩尔常数。

那么，从方程式（D-2）、式（D-3）和式（D-4），可以推导出以下方程：

$$\frac{m_f}{P_{an}} = k_{an}\left[(1 - U_f)\sqrt{M_{H_2}} + U_f\sqrt{M_{H_2}} \right] \tag{D-5}$$

用理想气体定律可以计算每一种气体的分压。对于氢气有

$$p_{H_2}V_{an} = n_{H_2}RT \tag{D-6}$$

式中，V_{an}是阳极通道体积；n_{H_2}是通道中氢分子的摩尔数；R 是理想气体常数；T 是燃料电池堆的温度。

得到氢气分压后，对时间求一阶导数得到以下方程：

$$\frac{d}{dt}(p_{H_2}) = \frac{q_{H_2}RT}{V_{an}} \tag{D-7}$$

氢气流量可以分为三个部分，它们的关系式可以表示如下：

$$\frac{d}{dt}(p_{H_2}) = \frac{RT(q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^{r})}{V_{an}} \tag{D-8}$$

式中，$q_{H_2}^{in}$是氢气进入通道的摩尔流量；$q_{H_2}^{out}$是氢气流出通道的摩尔流量；$q_{H_2}^{r}$是通道中氢气反应的摩尔速率。

氢气反应的摩尔速率通过下式估算：

$$q_{H_2}^{r} = \frac{N_o I}{2F} = 2K_r I \tag{D-9}$$

式中，N_o是电池堆中串联单体电池的数量；I 是电池堆的电流；F 是法拉第常数；K_r是模型常数。

联立式（D-9）、式（D-3）、式（D-4）和式（D-7），再经过拉普拉斯变换以后，可得分压方程如下所示：

$$p_{H_2} = \frac{1/k_{H_2}}{1 + \tau_{H_2}s}(q_{H_2}^{in} - 2K_r I) \tag{D-10}$$

式中，τ_{H_2}是与氢气流量相关的系统极点。

考虑电池堆的欧姆损失和忽略活化电压损失，电池堆的总电压可以写成

$$V = N_o\left[E_o + \frac{RT}{2F}\left(\ln\frac{p_{H_2}p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}} \right) \right] - rI \tag{D-11}$$

式中，V 是电池堆的总电压；rI 是电池堆的欧姆损失。

电池堆的输出电压由能斯特方程给出。由于电极的电阻以及通过电解液的氧离

子流量造成的电阻导致电池堆的欧姆损失，活化电压损失则由于电极表面的反应惰性而产生。为了能将电子移动到电极，燃料电池堆中的化学反应会造成部分电压损失。燃料电池产生的总功率为

$$p_{FC} = N_o VI \tag{D-12}$$

D.3 SOFC 发电系统模型

图 D-2 为用于仿真的 SOFC 系统模型。燃料电池总反应式为



$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O \tag{D-13}$$

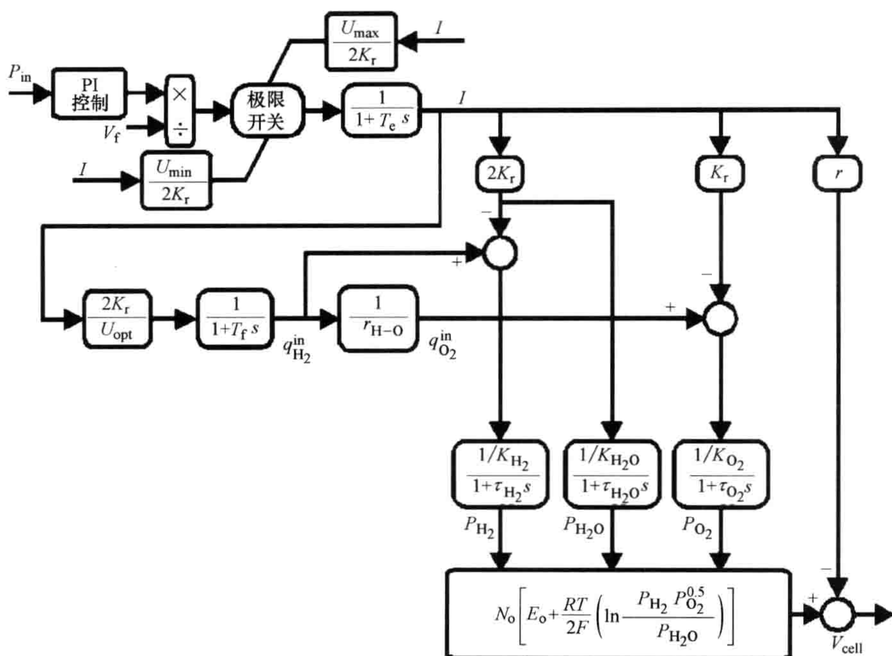


图 D-2　SOFC 系统模型

因此，氢和氧的化学计量比为 2:1。输入过量的氧气是为了让氢气与氧气完全反应，氧气的输入流量通过氢氧比值 r_{H-O} 控制。随着反应物流量的变化，需要时间来改变化学反应的参数，因此在燃料处理器中的化学响应是缓慢的，这个响应用一个包含时间常数 T_f 的一阶传递函数来表示。动态电响应采用包含时间常数 T_e 的一阶传递函数模拟，电响应与电能被负载消耗后电荷恢复的化学反应速率相关。SOFC 系统的输出功率等于电池堆的电流和电压的乘积。阳极与通道之间的压力差在正常的运行条件下保持在 4kPa 以下，在瞬态条件下可高达 8kPa。

D.3.1 模型参数

系统模型参数见表 D-1。

表 D-1 模型参数

参数	值
热力学温度(T)	1273K
法拉第常数(F)	96487000C/kmol
通用气体常数(R)	8341J/kmol/K
空载电压(E_o)	1.18V
燃料电池堆中串联单体电池的个数(N_o)	384
常数($K_r=N_o/4F$)	0.99×10^{-6}kmol/s/A
最大的燃料利用率(U_{max})	0.9
最小的燃料利用率(U_{min})	0.8
最优燃料利用率(U_{opt})	0.85
氢气阀摩尔常数(K_{H_2})	8.43×10^{-4}kmol/s/atm
水阀摩尔常数(K_{H_2O})	2.81×10^{-4}kmol/s/atm
氧气阀摩尔常数(K_{O_2})	2.52×10^{-3}kmol/s/atm
氢气响应时间(τ_{H_2})	26.1s
水响应时间(τ_{H_2O})	78.3s
氧气响应时间(τ_{O_2})	2.91s
欧姆损失(rI)	0.126Ω
燃料系统响应时间(T_f)	5s
电响应时间(T_e)	0.8s
氢-氧比率($r_{H\text{-}O}$)	1.145
额定功率(P_{rated})	100kW
参考功率(P_{ref})	100kW

D.3.2 功率及电压控制策略

模型中使用两个分离的 PI 控制器来控制系统的燃料流量，以满足在指定的逆变器输出交流电压下的功率需求。SOFC 系统的电压作为控制函数的输入。控制器生成逆变器交流电压的相角和调制系数。

逆变器的交流电压、有功和无功功率输出可以表示如下：

$$V_{ac}=mV_{cell}\angle\delta \tag{D-14}$$

$$P_{ac}=\frac{mV_{cell}V_s}{X}\sin\delta \tag{D-15}$$

$$Q_{ac}=\frac{mV_{cell}^2-mV_{cell}V_s}{X}\sin\delta \tag{D-16}$$

式中，m 是调制系数；V_{cell}是 SOFC 的直流电压；V_s是负载电压；δ 是交流电压的相角；X 是外部线路电抗。

假设逆变器是无损耗的，则

$$P_{ac}=P_{dc}=V_{cell}I \tag{D-17}$$

现在，氢气流量可以表示为

$$q_{H_2}=\frac{2K_rI}{U_{opt}} \tag{D-18}$$

式中，I 是 FC 额定电流；K_r为常数；U_{opt}为最佳燃料利用率。

根据式（D-18）并假设 δ 非常小，δ 可以被表示为

$$\delta=\frac{U_{opt}X}{2K_rmV_s}q_{H_2} \tag{D-19}$$

式（D-19）说明了如何通过控制氢气流量来控制 AC 电压的相角。

基于交流功率和相角的表达式，现在可以通过控制氢气流量来控制有功功率输出。功率和电压控制策略如图 D-3 所示。

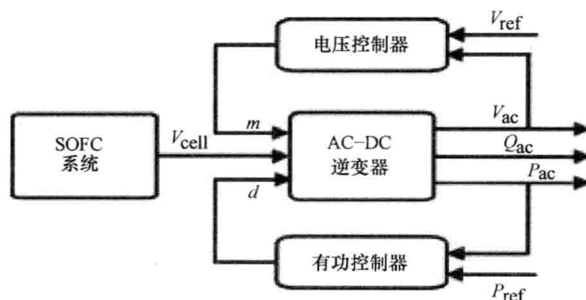


图 D-3　功率及电压控制策略

实际的逆变器交流功率和电压被反馈到控制器生成调制系数和交流电压的相角。

D.4　案例研究

为了分析 SOFC 系统的动态特性，在 $t=50$s 时加载一个 50 ~ 100kW 的阶跃负荷。同时电压控制器被设定为维持逆变器输出交流电压在指定值上。得到的仿真结果如图 D-4 ~ 图 D-14 所示，结果说明系统的动态特性在负载阶跃变化的情况下仍能使逆变器交流电压保持在恒定水平。电池堆的电压及电流变化、功率输出变化及逆变器交流电压变化、氢气流量变化、氧气流量变化以及阳极与阴极压力差变化可以从仿真结果中观察到。

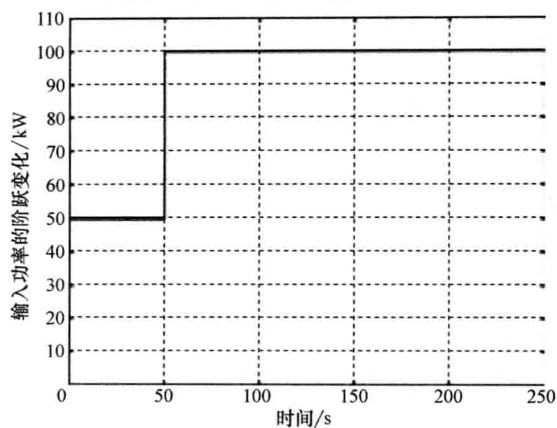


图 D-4 功率需求的阶跃变化

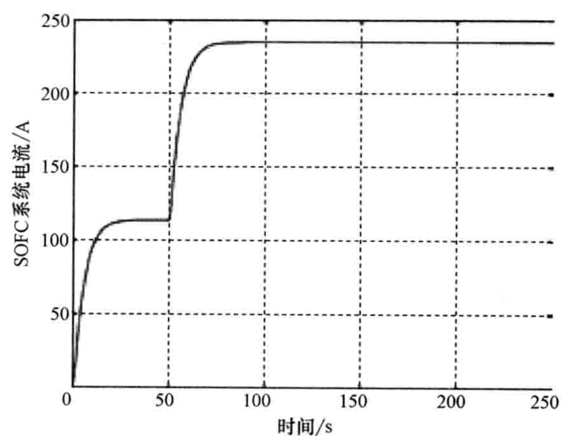


图 D-5 电池堆电流

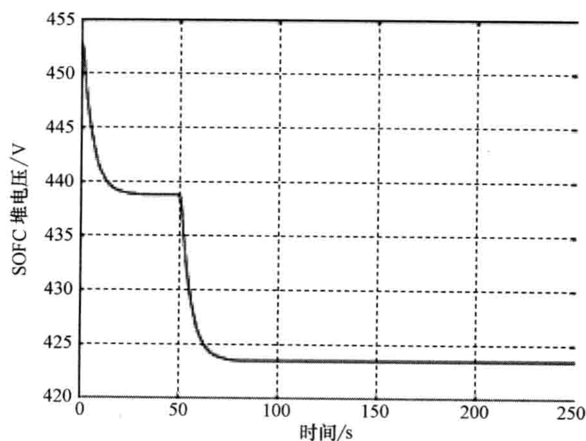


图 D-6 电池堆电压

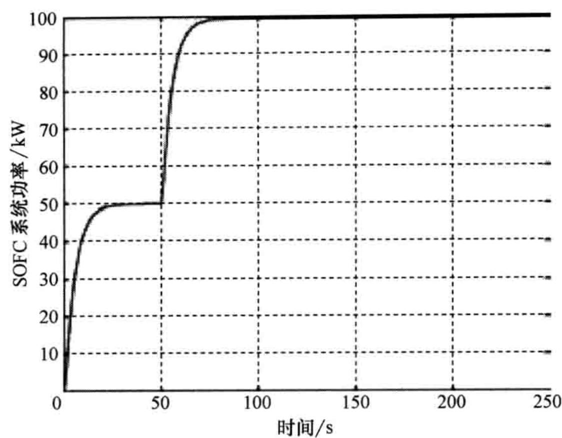


图 D-7 燃料电池系统功率输出

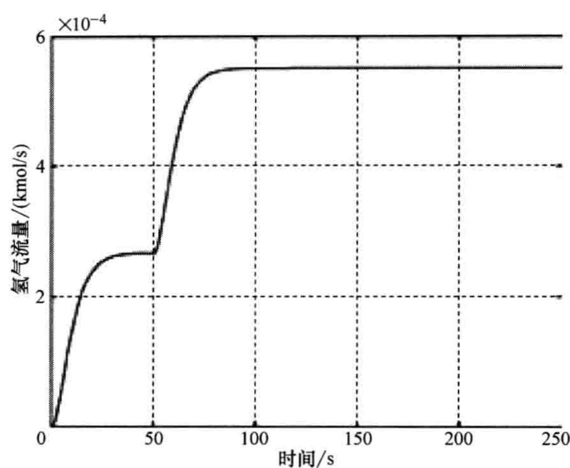


图 D-8 氢气流量

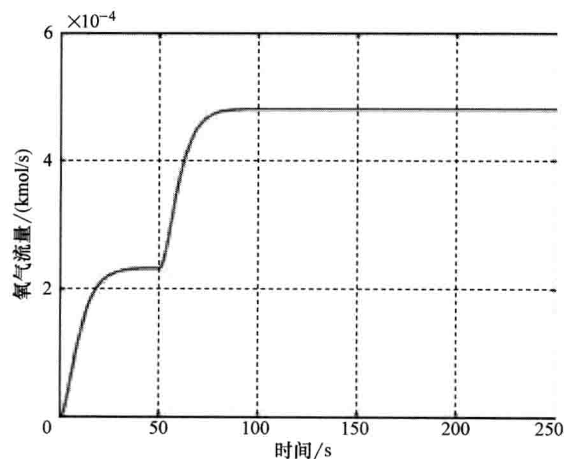


图 D-9 氧气流量

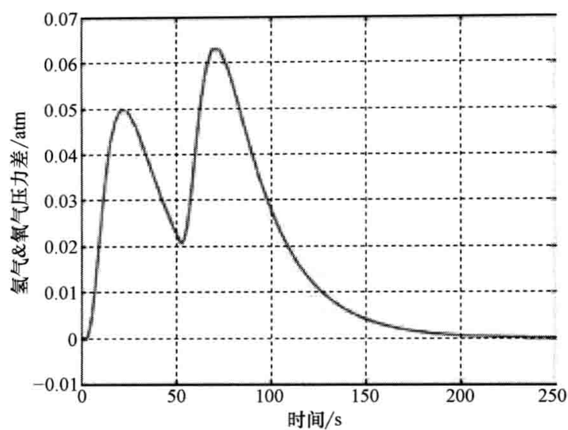


图 D-10 H_2-O_2 压力差

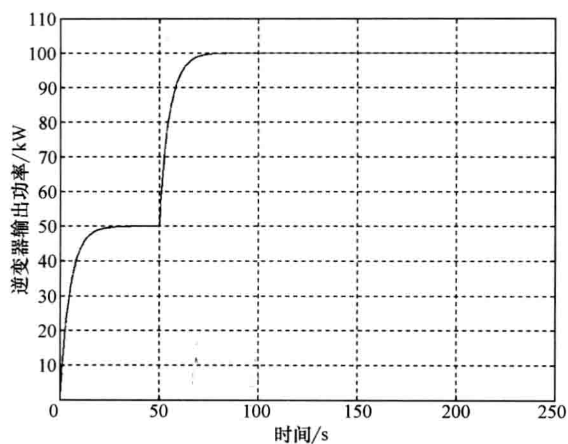


图 D-11 逆变器交流功率输出

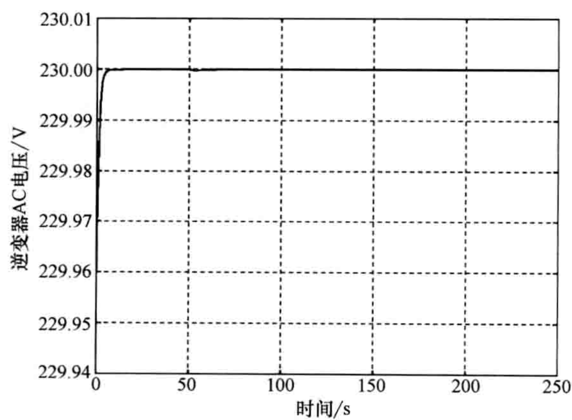


图 D-12 逆变器交流电压

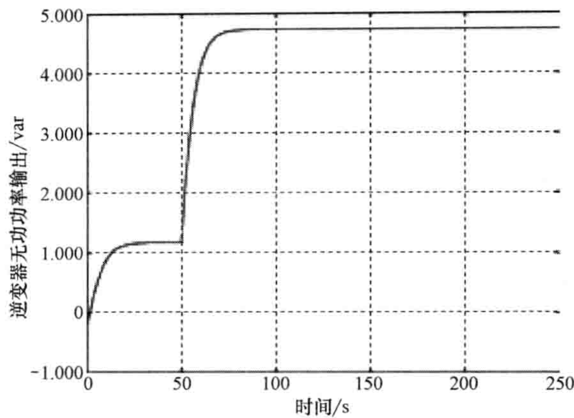


图 D-13 逆变器有功功率

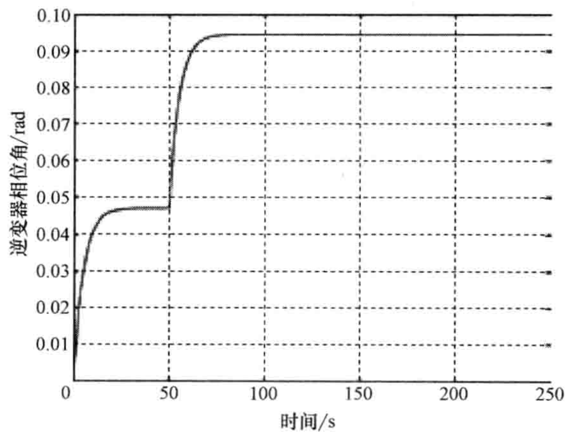


图 D-14 逆变器交流电压相角

附录 E 最大功率点跟踪的独立光伏电站建模和性能评估

符号列表

I_{ph}	双二极管模型中的光电流
I_{s1}，I_{s2}	双二极管模型中的二极管饱和电流
R_s	双二极管模型中的串联电阻
R_p	双二极管模型中的并联电阻

A	二极管系数
V	电池端电压，单位：V
I	电池端电流，单位：A
E	太阳辐照度，单位：W/m^2
T	环境温度，单位：K
k	波尔兹曼常数
e	电子电荷
V_{oc}	每个电池的开路电压
P_m	每个电池的最大功率
V_{pm}	每个电池的最大功率点电压
I_{pm}	每个电池的最大功率点电流
N_s	电池串联数
N_p	电池并联数
V_{ocar}	阵列的开路电压
P_{mar}	阵列的最大功率
V_{pmar}	阵列的最大功率点电压
I_{pmar}	阵列的最大功率点电流
R_{in}	每个电池的内阻
R_{inar}	阵列的内阻

E.1 光伏建模

光伏电站由多个带有逆变器接口的 PV 阵列组成。无论太阳辐照度 E(W/m^2) 和环境温度 T(K) 如何变化，逆变器都能保持规定等级的交流电压输出。拥有最大功率点跟踪（Maximum Power Point Tracking，MPPT）特征的逆变器，通过设置阵列的运行点电压来从阵列中读取最大功率。本节主要讨论在 MATLAB Simulink 中多晶硅 PV 阵列的稳定且简单的数学模型开发，该仿真具有如下三个特点：①系统计算负担较轻；②数据存储需求较低；③可以用 MATLAB Simulink 的一套标准模块来表示。同时，此模型可以通过纳入 MPPT 特性来考虑由太阳辐照度和环境温度变化引起的 PV 阵列的输出变化。这一特性使模型运行电压的设定值跟踪最大功率点电压以获得最大功率。此模型主要用于：①详细研究天气变化和带负荷情况下的 PV 阵列性能；②对独立光伏电站进行仿真，研究其对交流侧母线上负荷变化的影响；③为光伏电站制定简单的减载方案。

E.2 多晶硅电池的双二极管模型

图 E-1 示出了典型多晶硅光伏电池的标准双二极管模型，并用下式来说明多

晶硅电池的电压-电流特性。

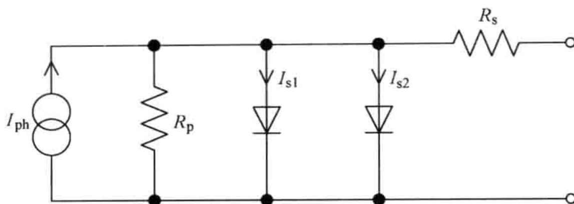


图 E-1 多晶硅 PV 电池的双二极管模型

$$I = I_{ph} - I_{s1}\left[e^{(V+IR_s)/V_t} - 1\right] - I_{s2}e^{(V+IR_s)/AV_t} - \frac{V+IR_s}{R_p} \tag{E-1}$$

式中，$V_t = KT/e$。 (E-2)

在式（E-1）和式（E-2）中，V 和 I 分别为电池的端电压和端电流；K 是波尔兹曼常数；T 是绝对环境温度（K）；e 是电子电荷。通常将二极管系数 A 调到 2 以逼近光敏二极管中空间电荷层的肖克莱-里德-霍尔复合（Shockley-Read-Hall Recombination）。此模型的参数 I_{ph}、I_{s1}、I_{s2}、A、R_s 和 R_p是根据辐照度 E(W/m^2）和环境温度 T(K）计算得出。这一计算使用了关系式（E-3）~式（E-8），这几个式子是根据早期著作中报告的实验室多晶硅电池特性而得出的：

$$I_{ph} = K_0E(1 + K_1T) \tag{E-3}$$

$$I_{s1} = K_2T^3e^{(K_3/T)} \tag{E-4}$$

$$I_{s2} = K_4T^{1.5}e^{(K_5/T)} \tag{E-5}$$

$$A = K_6 + K_7T \tag{E-6}$$

$$R_s = K_8 + K_9/E + K_{10}T \tag{E-7}$$

$$R_p = K_{11}e^{(K_{12}T)} \tag{E-8}$$

E.3 光伏阵列建模

光伏阵列的模型是一个带有串联内阻的理想直流电压源，如图 E-2 所示，这样理想直流电压源和内阻就取决于 E 和 T。直流电压源连接到逆变器上，逆变器将直流电压源的 PV 输出转化成三相、415V、50Hz 的适合供给负荷的交流电。整个建模过程和后续的研究均已在 MATLAB Simulink 中进行过。MATLAB 中的标准逆变器模块可以用来建立逆变器接口模型，同时无需开发单独的数学模型。

在此模型中，为了达到所要求的电压、电流和额定功率，假设 PV 阵列包含 N_s 个串联电池和 N_p 个并联电池组合。通过与太阳辐照度和环境温度条件相对应，将阵列的直流端电压维持在最大功率点电压 V_{pmar}上，同时将理想直流电压源设置成阵列的开路电压 V_{ocar}。V_{pmar}、V_{ocar}和阵列内阻 R_{inar}是从每个电池的开路电压 V_{oc}、最大功率点电压 V_{pm}和最大功率点电流 I_{pm}计算得出的。根据图 E-1 所描述的双二极管模型

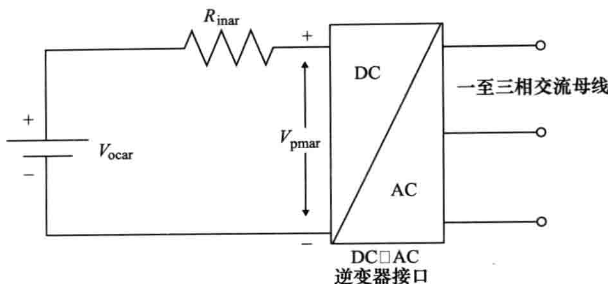


图 E-2　连接到 DC-AC 逆变器的 PV 阵列的等效电路

的建模程序，V_{oc}、V_{pm}和I_{pm}由每个电池生成的 V-I 特性曲线和功率曲线决定。建模程序的流程图如图 E-3 所示。

各个参数详细的数学计算见本节 E.3.1～E.3.4 节。

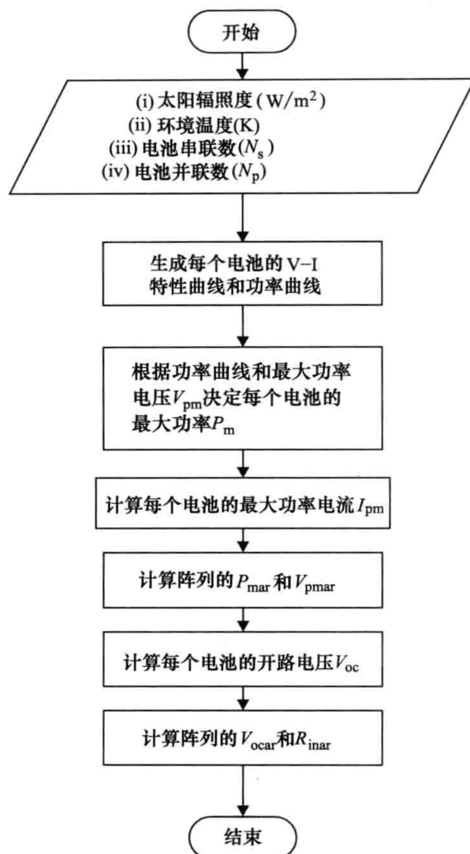


图 E-3　PV 阵列等效电流的计算流程图

E.3.1　V_{oc}的计算

如式（E-9）所示，单个电池的开路电压 V_{oc}由双二极管模型中设置 $I=0$ 和$V=V_{oc}$来决定。V_{oc}是全开路情况下终端电压 V 能达到的最大值：

$$V_{oc}=R_p[I_{ph}-I_{s1}(e^{V_{oc}/V_t}-1)-I_{s2}e^{V_{oc}/AV_t}] \tag{E-9}$$

E.3.2　P_m、V_m 和 I_{pm}的计算

通过将 V 从 0 调到 V_{oc}，并把 V、I 和 $P=VI$ 的值存为独立数组以生成电池的 V-I 特性曲线和功率曲线。从功率数组中搜索出最大值 $P_m=P[i]$，然后通过设定$V_{pm}=V[i]$ 来获取最大功率点电压 V_{pm}，其中 i 是最大功率 P_m 对应的坐标点。同样地，最大功率点电流 I_{pm} 也是通过设置 $I_{pm}=I[i]$ 而得到的。

E.3.3　V_{ocar}、P_{mar}和 V_{pmar}的计算

阵列的开路电压、最大功率和最大功率点电压计算如下：

$$V_{ocar}=V_{oc}N_s \tag{E-10}$$

$$P_{mar}=P_{ma}N_sN_P \quad (E\text{-}11)$$

$$V_{pmar}=V_{pm}N_s \quad (E\text{-}12)$$

虽然 R_{inar}可以只用 V_{oc}、V_{pm}和 I_{pm}来计算，但 V_{pmar}和 P_{mar}的计算是为了 PV 阵列的性能评估。

E.3.4 内阻 R_{inar}的计算

在计算阵列的内电压时，可以假设每个电池从 V_{oc}到 V_{pm}的变化是线性的，即电流 $I=0$ 到 $I=I_{pm}$的变化引起端电压从 V_{oc}降到 V_{pm}。同时假设逆变器的直流侧电压必须等于 V_{pm}。因此，对于每个电池来说，内阻的值可以通过 $R_{in}=(V_{oc}-V_{pm})/I_{pm}$来计算。对于阵列来说，内阻为 R_{in}的 N_s 个串联和 N_p 个并联组合得出 R_{inar}的值如下：

$$R_{inar}=\frac{V_{oc}-V_{pm}}{I_{pm}}\frac{N_s}{N_p} \quad (E\text{-}13)$$

在该计算中，所使用的系数 K 的计算已在早期著作中提及。K、E、T、N_s、N_p 的值见表 E-1。

表 E-1 输入系数和参数的值

输入系数/参数	值	输入系数/参数	值
K_0	$-5.729e^{-7}$	K_8	1.47
K_1	-0.1098	K_9	$1.6126e^{-3}$
K_2	44.5355	K_{10}	$-4.47e^{-3}$
K_3	$-1.2640e^4$	K_{11}	2.3034e6
K_4	11.8003	K_{12}	$-2.8122e^{-2}$
K_5	$-7.3174e^3$	N_s	2000
K_6	2	N_p	400
K_7	0		

E.4 案例研究及结果

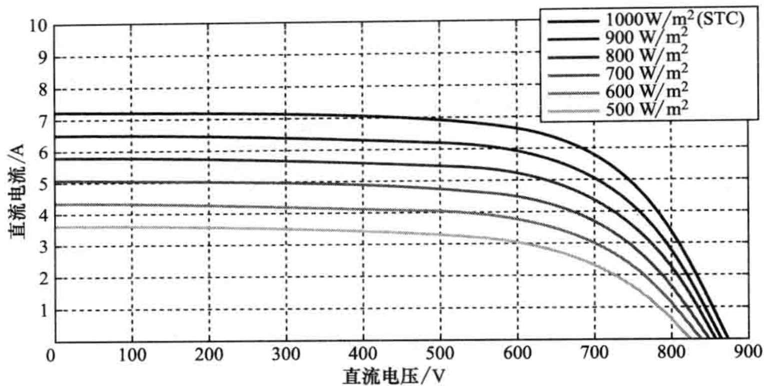
E.4.1 案例 1

（1）不同太阳辐照度和恒定环境温度下生成的 V-I 特性曲线和功率曲线。

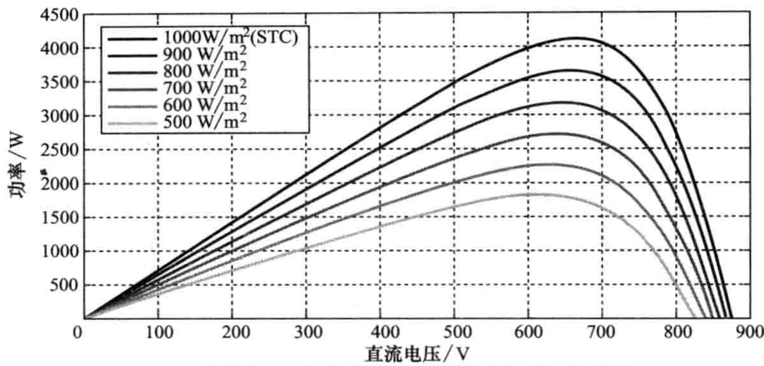
图 E-4a 和 b 示出了环境温度恒定为 25℃（$T=298$K）和太阳辐照度分别为 $E=500\text{W/m}^2$、600W/m^2、700W/m^2、800W/m^2、900W/m^2 和 1000W/m^2 的条件下程序生成的 V-I 特性曲线和功率曲线。表 E-2 给出了 V_{ocar}、R_{inar}、P_{mar}和 V_{pmar}在相同条件下的值。

（2）不同环境温度和恒定太阳辐照度下生成的 V-I 特性曲线和功率曲线。

图 E-5a 和 b 示出了太阳辐照度恒定为 $E=1000\text{W/m}^2$ 下，环境温度分别为 5℃、15℃、25℃、35℃和 45℃（即 $T=278$K、288K、298K、308K 和 318K）下程



a) 阵列在T=25℃和不同太阳辐照度下生成的V-I特性曲线



b) 阵列在T=25℃和不同太阳辐照度下生成的功率曲线

图 E-4

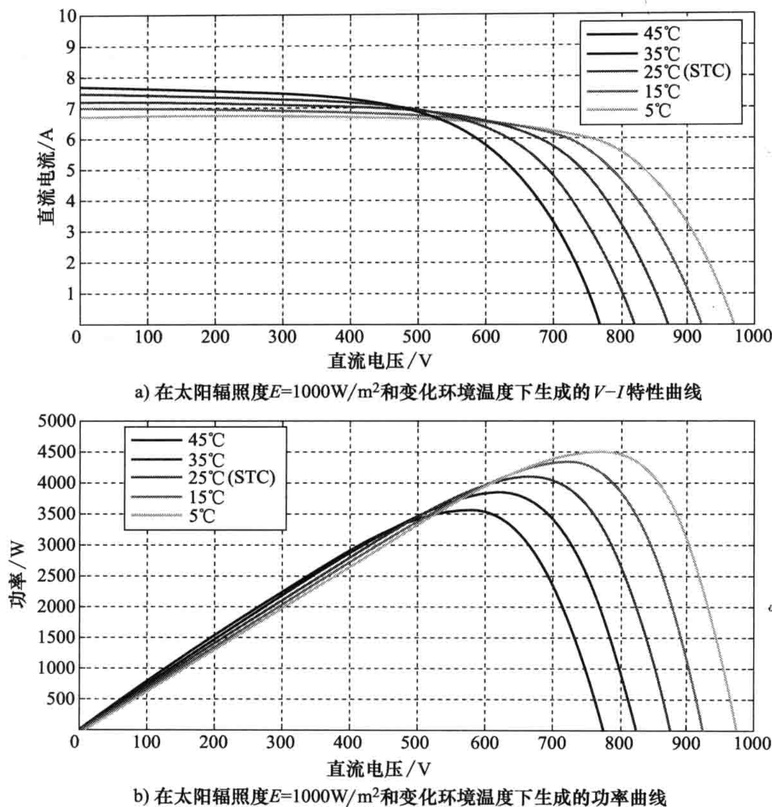
表 E-2 在 25℃温度和不同太阳辐照度下的参数计算值

$E/(\mathrm{W/m^2})$	V_{ocar}/V	V_{pmar}/V	P_{mar}/W	R_{inar}/Ω
1000	873.42	660	4124	34.16
900	866.42	660	3652	37.31
800	858.47	660	3181	41.18
700	849.29	630	2721	50.78
600	838.44	630	2720	57.85
500	825.22	630	1821	67.54

序生成的 V-I 特性曲线和功率曲线。表 E-3 给出了 V_{ocar}、R_{inar}、P_{mar}和 V_{pmar}在这些条件下的值。

表 E-3 在太阳辐照度 1000W/m² 和不同环境温度下的参数计算值

T/K	V_{ocar}/V	V_{pmar}/V	P_{mar}/W	R_{inar}/Ω
278	972.51	750	4566	36.54
288	923.19	720	4360	33.55
298	873.42	660	4124	34.16
308	823.18	600	3857	34.72
318	772.44	570	3590	32.15



a) 在太阳辐照度E=1000W/m²和变化环境温度下生成的V-I特性曲线

b) 在太阳辐照度E=1000W/m²和变化环境温度下生成的功率曲线

图 E-5　在太阳辐照度 $E=1000\mathrm{W/m^2}$ 和变化环境温度下生成的 V-I 特性曲线和功率曲线

E.4.2　案例 2

如图 E-6 所示，此模型用于开发一个可以通过 DC-AC 逆变器接口来给交流负荷供电的独立 PV 系统。它被用来研究在特殊太阳辐照度和天气条件下，阶跃负荷对 50Hz 的三相 415V 交流侧母线所带来的影响。

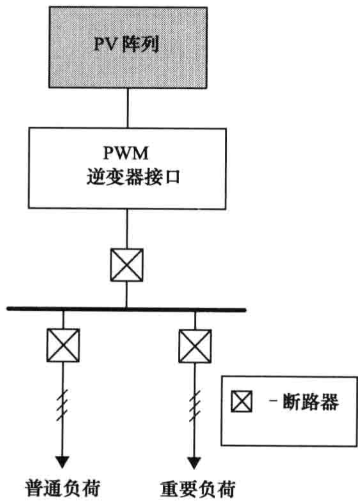


图 E-6　独立 PV 系统

(1) $E=1000\mathrm{W/m^2}$ 和 $T=298\mathrm{K}$ (25℃) 时

表 E-4 列出了当 $E=1\ 000\ \mathrm{W/m^2}$ 和 $T=298\mathrm{K}$ (25℃) 时，在不同负荷下交流母线电压值。从表 E-4 可以清楚地看出：在交流侧负荷接近 4100W 时母线电压固定在 415V，这与在表 E-2 中得出的最大功率容量 4 124W 相符合。图 E-7 给出了在 6s 内负荷从 3690W 到 4920W 有 5 个阶跃变化的条件下交流母线电压分布的变化情况。

表 E-4 案例 2 的（1）模型不同负荷下的电压值

负荷变化	负荷/W	交流母线上的实测电压/V	电压变化
相应于阵列最大额定功率(4124W)	4100	415	母线电压维持在规定等级
减少 10%	3690	429	上升 3.37%
减少 20%	3280	445	上升 7.23%
增加 10%	4510	401	下降 3.37%
增加 20%	4920	388	下降 6.50%

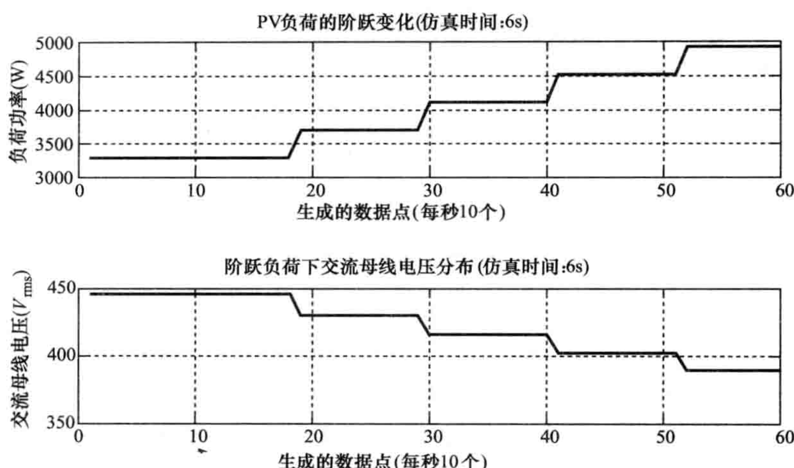


图 E-7 $E=1000\text{W/m}^2$ 和 $T=298\text{K}$ 时，阶跃负荷的交流母线电压分布

（2） $E=800\text{W/m}^2$ 和 $T=298\text{K}$ （25℃） 时

表 E-5 列出了 $E=800\text{W/m}^2$ 和 $T=298\text{K}$ （25℃） 时，交流母线在不同负荷下的电压值。从表 E-5 可以清楚地看出：在交流侧负荷接近 3 160W 时母线电压固定在 415V，这与在表 E-2 中得出的最大功率容量 3181W 相符合。图 E-8 给出了在 6s 内负荷从 2528W 到 3792W 有 5 个阶跃变化的条件下交流母线电压分布的变化情况。

表 E-5 案例 2（2）模型中不同负荷下的电压的值

负荷变化	负荷/W	交流母线上的实际电压/V	电压变化
相应于阵列最大额定功率(3181W)	3160	415	母线电压维持在规定等级
减少 10%	2844	429	上升 3.37%
减少 20%	2528	443	上升 6.47%
增加 10%	3476	402	下降 3.13%
增加 20%	3792	390	下降 6.02%

E.4.3 案例 3：减载方案的建模

此模型可以用来给图 E-6 中的独立 PV 系统制定一个减载方案。此方案旨在维持交流母线的负荷水平，使之能适合 PV 系统最大额定功率所需的负荷水平，这样交流母线上的电压下降不会超过一个预设的百分比。就本案例来说，允许的电压下降比为 2%，但是用户可以自行更改这个限值。减载模块在 415V 交流母线上测量

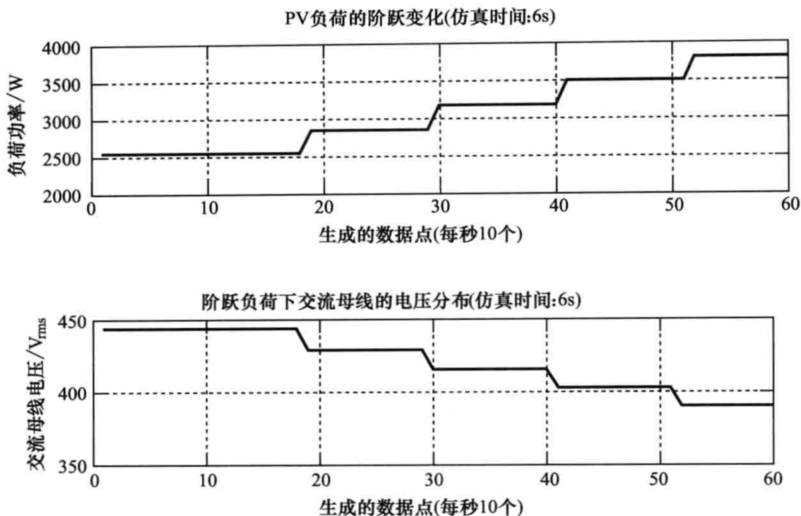


图 E-8　$E=800\mathrm{W/m^2}$ 和 $T=298\mathrm{K}$ 时，阶跃负荷下交流母线的电压分布

电压分布的变化，然后在2s的延迟后产生一个跳闸信号（逻辑0）让这些额外的负荷断路器动作实现减载。程序中加入2s的延迟是为了避免由于在同一母线开断其他负荷引起的电压瞬变而导致发生误跳闸。这个时间延迟的设定值也可以根据用户需要来进行更改。

此案例表明，在 $t=0.2\mathrm{s}$、$E=1000\mathrm{W/m^2}$ 和 $T=298\mathrm{K}$（见表E-2）时，切除超过4 100W最大功率容量20%的额外负荷820W。电压传感模块允许额外负荷存在2s，然后生成跳闸信号并切除额外负荷。负荷功率、电压分布和产生的跳闸信号如图E-9所示。

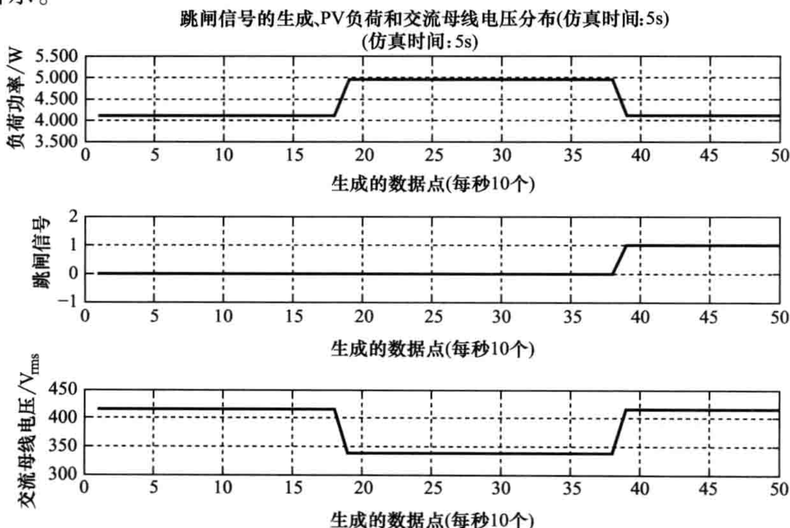


图 E-9　跳闸信号的生成、PV负荷和交流母线电压分布

附录 F 微电网电力方案中市场出清价格的设定

F.1 微电网参与的市场结构建议

本节提出并分析了一种由微电网提供的电能参与竞争性电力市场的定价机制，其中微电网中央控制器将参与投标过程，并结算出市场出清价（Market Clearing Price，MCP）。目前，日前交易和实时交易这两种重要的市场结算手段是可再生能源分布式发电（DG），即光伏发电和风能发电，参与电力市场的主要策略。主要的思路就是集合不同类型的分布式发电来供应不同类型的用户群，以决定 MCP。这些用户可分为可切除负荷和不可间断负荷。

电力市场机制是通过电力供需定价来影响电力购销。降低电价始终是引入有竞争力的电力市场的首要原因。微电网运行于本地市场并且通常为一些中型的工业/商业用户和居民用户供电，这些用户并没有财政激励和专业知识，所以难以为复杂的本地市场定价机制做出有效贡献。由于缺乏示范，大多数电力市场并没有把用户作为一个可以做出理性选择的需求侧，而是简单地认为用户是一个必须在任何情况下保证其需求的负荷。在这些市场中需求侧主动参与电力市场交易的情况仍然比较少。

主要的思路就是集合不同类型的分布式发电来供应不同类型的用户群，以决定 MCP。这些用户可分为可切除负荷和不可间断负荷。考虑以下五种不同的投标者：

（1）投标者 1：微燃机。

（2）投标者 2：燃料电池。

（3）投标者 3：柴油发电机。

（4）投标者 4：风力发电。

（5）投标者 5：光伏发电。

投标者 1 ~ 3 属于热电联产系统，投标者 4、5 属于可再生能源发电。如图 F-1 所示，其构建了一个可以让发电侧和负荷侧都能主动参与，从而形成电力交易的市场模型。两种重要的市场结算手段——日前交易和实时交易已被广泛应用在电力市场中。日前交易电力市场被设计为提前一天给参与者提供交易价格。在日前市场报价结束后，系统运行人员基于报价来计算出日前交易的市场出清价格，并且要考虑提交方案的最低成本、安全约束、机组组合等方面来做出下一个运行日每个小时的计划。实时交易市场被设计用来给在日前交易计划中未选到的发电机组提供发电机会；这些机组为了能在实时交易市场中获得使用可以更改报价，否则其在原先日前市场中的报价仍保持不变。

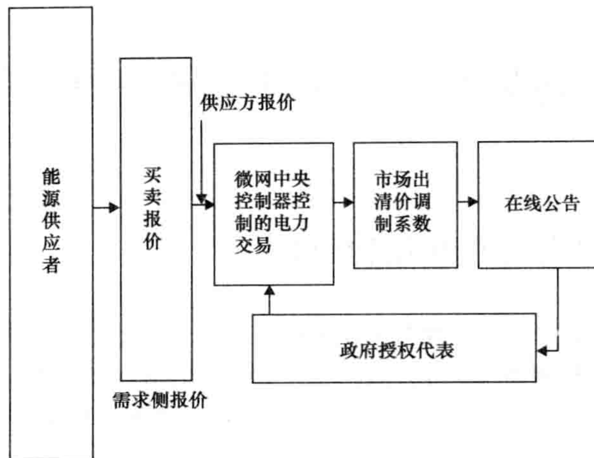


图 F-1 微电网市场模型商业结构

F.2 竞价程序

良好的交易机制是市场的基本要求，但是电力市场的寡头垄断属性大大降低了市场的效率。在寡头垄断市场中，少数几个发电商为了赢得市场份额而相互竞价来给用户供电。在当今的电力市场中，单边报价（发电侧）或双边报价（发电侧和用户侧）的方式都在使用。无论是单边报价或是双边报价，发电商都不知道当前的电力需求水平，也不知道当前发电机组的可用容量，这会引起买卖双方竞价方面的复杂化和不确定性。进一步说，电力拍卖市场在同一时间会有不止一个商品拿出来竞价，例如实时电量、运行备用以及其他的辅助服务。

发电商有两个投标选择：①发电组合（Block-generation）投标；②密封投标拍卖。第一种选择，供应商希望通过发电成本估算、需求变动的时间因素、机组组合成本和其他商业考虑来赢得一部分负荷。第二种选择，供应商向电力交易库运营商提交他们有竞争力的报价，以供应运营商预测的负荷。每个发电商的目标都是利益最大化，而运营商则使用调度策略减轻用户的费用负担。

有两种竞标机制应用于电力市场：①只有发电商参与的单边报价；②发电商和用户共同参与的双边报价。

F.3 MCP 规则

电力拍卖有三条重要的定价规则，但只有其中两条普遍用于实时交易市场：①统一或单独的市场出清价格规则；②有差别的或按竞价支付的市场出清规则。前者在电力市场中比较常用。在交易过程中，销售商需要接受为其电能确定的 MCP，即

使他们的出价低于这个价格，而所有的用户都需按照 MCP 来支付，即使他们的竞价高于这个价格。这个竞价系统背后的原理是所有出售电力的报价最终都会根据其边际成本来确定。对于后者而言，每个赢得拍卖的参与者按照其自己的报价来支付或者收取电价。在这种机制下，投标价格是通过猜测最后一个入围的边缘电价来定的，而与边际成本无关。这种猜测是通过观察一天中每小时的标价来完成的。这一过程的缺点是一些低成本的发电公司的估算会出现偏差并且投出超过边缘价格的电价。这样，某些高成本发电公司可以进行发电而低成本发电公司将被闲置，发电成本将会升高到超过市场出清价格的水平。按标价支付的竞价系统可能会提高总的发电成本，因此也较统一市场出清价格系统的效率低。随着电力部门放宽管制，实施统一的定价机制将成为一种自然而然的选择，因为这样可以激励投标者披露其真实的成本。

F.4 MCP 的公式

市场出清价格取决于总供应和需求曲线的交点，定义为两曲线相交的最低价格。在这个价格下，发电供应商和客户的需求都可以得到满足，并且能从竞价成功的卖方那里获取足够的电力供应给报价成功的买方。销售竞标通常按从最低标价到最高标价的顺序选择，也就是自下而上的顺序。而在买入竞标中是按从最高标价到最低标价的顺序选择，也就是自上而下的顺序。在市场出清价格下，总的买入投标将会等于总的销售投标。在市场机制中，供应和销售投标属于同种类型，即块（Block）投标或线性投标。本节将详细分析线性投标在竞争市场的出清价格。

F.4.1 单边报价市场

在这个市场中供电公司参与竞标，而用户的需求被视为与市场价格无关的常量。市场由 CHP 发电机、可再生能源和柴油备用发电机组成。柴油发电机通常作为备用，但是为了进行比较，其被当做主发电机。

现在，如果投标者 1 以 p \$/kW·h 的价格供应 $Q_{1(p)}$ kW 的电力，其供应曲线可表示为

$$Q_{1(p)}=\frac{p}{m_{s1}}=Q_{1elec}+Q_{1Th} \tag{F-1}$$

式中，Q_{1elec}是微燃机的有功出力（kW）；Q_{1Th}是微燃机产生的热能，通过焦耳常数可转换为等效的电力负荷；m_{s1}是投标者 1 的供应曲线的斜率。

类似地，如果 $Q_{2(p)}$ kW 是由投标者 2 以 p \$/kW·h 的价格供应，其供应曲线可以表达为

$$Q_{2(p)}=\frac{p}{m_{s2}}=Q_{2elec}+Q_{2Th} \tag{F-2}$$

式中，Q_{2elec}为燃料电池系统产生的有功出力；Q_{2Th}为燃料电池产生的热能，通过

焦耳常数可转换为等效电力负荷；m_{s2}是投标者 2 的供应曲线的斜率。

类似地，合并 N 个投标者的供应曲线得到：

$$Q_{(p)} = Q_{1(p)} + Q_{2(p)} + \cdots + Q_{N(p)} = \frac{p}{m_{s1}} + \frac{p}{m_{s2}} + \cdots + \frac{p}{m_{sN}} = p\sum_{j=1}^{N}\frac{1}{m_{sj}} \tag{F-3}$$

在 MCP(p^*) 下，假设需求固定为 D

$$Q(p^*) = D$$

或：

$$p^*\sum_{j=1}^{N}\frac{1}{m_{sj}} = D$$

因此

$$p^* = \frac{D}{\sum_{j=1}^{N}(1/m_{sj})} \tag{F-4}$$

在式（F-4）中，是假设投标者拥有足够的发电容量。如果容量受到限制，最小发电（$Q_{\min}$）和最大发电（$Q_{\max}$）被设定，那么合并的供应曲线可表示为

$$Q(p) = p\sum_{j=1}^{N}\frac{1}{m_{sj}}[U(Q - Q_{\min}) - U(Q - Q_{\max})] \tag{F-5}$$

其中，$U(Q - Q_{\min}) = 1$，当 $Q \geqslant Q_{\min}$时

$= 0$，当 $Q < Q_{\min}$时

$U(Q - Q_{\max}) = 1$，当 $Q \geqslant Q_{\max}$时

$= 0$，当 $Q < Q_{\max}$时

将 D 代入式（F-5），就能算出市场出清价格（p^*）。

F.4.2 双边报价市场

在这个市场中，负荷需求曲线为弹性。在制定市场出清价格（p^*）时需要同时考虑需求侧和供应侧的投标。分析中也考虑供应和需求随着价格的线性波动。

令 $D(p)$ 为有 N 个参与市场的用户以及电价为“p” \$/kW·h 的情况下总负荷需求，则 $D(p)$ 可表示为

$$D(p) = \sum_{j=1}^{N}\frac{p_0}{m_{dj}} - \sum_{j=1}^{N}\frac{p}{m_{dj}} \tag{F-6}$$

图 F-2 示出了线性需求和供应投标曲线。其中 p_0 为需求曲线在竖轴上的截距，随用户类型而变化。在一个特定价格（p）下，$D_{(p)}$将被视为所有用户的总需求；因此

$$D(p) = \sum_{j=1}^{N}\frac{p_0}{m_{dj}} - p\sum_{j=1}^{N}\frac{1}{m_{dj}} \tag{F-7}$$

在 MCP（p^*）下，

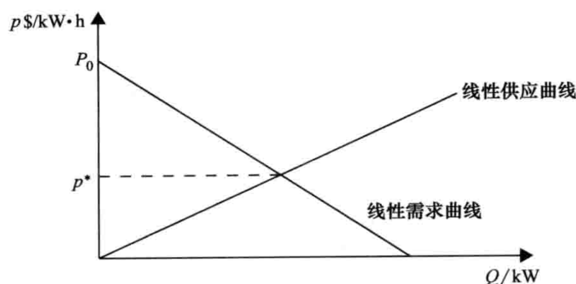


图 F-2 线性需求和供应报价曲线

$$p^*\sum_{j=1}^{N}\frac{1}{m_{sj}} = \sum_{j=1}^{N}\frac{p_0}{m_{dj}} - p^*\sum_{j=1}^{N}\frac{1}{m_{dj}} \tag{F-8}$$

因此，MCP 可以从下式计算得出：

$$p^* = \frac{\sum_{j=1}^{N}(p_0/m_{dj})}{\sum_{j=1}^{N}(1/m_{sj} + 1/m_{dj})} \tag{F-9}$$

F.5 案例研究

考虑的微电网系统包括如下发电竞争者：

(1) 投标者 1：微燃机。

(2) 投标者 2：燃料电池。

(3) 投标者 3：柴油发电机。

(4) 投标者 4：风力发电。

(5) 投标者 5：光伏发电。

以上这几项在表 F-1 中给出了详细的参数。

表 F-1 投标者参数

发电机	m_s($/kW·h)	Q_{gmax}/kW	Q_{gmin}/kW	热效率/(kJ/kW·h)
投标者 1(微燃机)	0.1056	30	以最小功率来满足热负荷	12186
投标者 2(燃料电池)	0.1386	50	$D_{(0)}$	9480
投标者 3(柴油发电机)	0.063	60	0	—
投标者 4(风力发电)	0.27	10	0	—
投标者 5(光伏发电)	0.4756	20	0	—

F.5.1 案例 1：有固定需求的线性供应报价（即单边报价市场）

此案例使用一个 80kW 的固定负荷，进行如下分析：

(1) 假定可再生能源发电机均不可用。只靠热电联产发电（投标者 1 和 2）和柴油发电（投标者 3）来供应负荷。投标者 1、2、3 的独立供应曲线和联合供应曲线如图 F-3 所示。

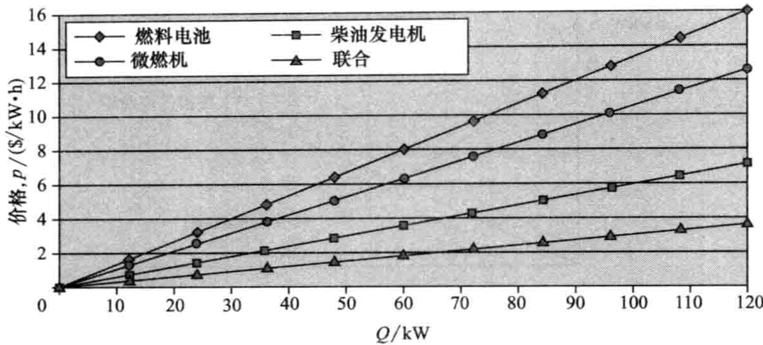


图 F-3 投标者 1、2 和 3 的独立和联合供应曲线

市场出清价格是由联合供应曲线与从 $Q=80\mathrm{kW}$ 画出的垂线的交点得出的。在此案例中，MCP = $ 2.5/kW · h。

各个发电机为了满足 80kW 负荷而供应的电能见表 F-2。

表 F-2 投标者供应

发电机	发电机输出/kW	支付金额/ $
投标者 1(微燃机)	24.0	60
投标者 2(燃料电池)	18.0	45
投标者 3(柴油发电机)	48.0	120
总计	80.0	225

(2) 在此案例中认为可再生能源的联合发电量大约为 30kW，但这些发电机并未参与到投标过程中。其次，认为风力发电和光伏发电只在白天有效，这就减少了投标者 1、2、3 的总输出量（从 80kW 减至 50kW）。案例中 MCP 是由联合供应曲线与从 $Q=80\mathrm{kW}$ 画出的垂线的交点得出的。此案例中的 MCP = $ 1.5/kW · h。由于市场出清价格的降低，将无法收回可再生能源的成本及其不可用时的额外成本。因此市场出清价格应该固定为 $ 1.5/kW · h，而投标者的有功输出量将会减少：

$$\Delta Q_{\mathrm{i}}=\frac{\Delta p}{m_{sj}} \tag{F-10}$$

(3) 在此案例中，研究了可再生能源参与竞标的影响。风力发电和光伏发电都是不稳定的。风力发电和光伏发电输出变化以及不同投标价（m_{s}）下的 MCP 如图 F-4 所示。

图 F-4 显示了两种情况，即①受限制的可再生能源；②不受限制的可再生能源。

受限制的可再生能源：如果可再生能源竞价 $m_{\mathrm{s}}=0$，它将全部输出而 MCP 为 $ 1.5/kW · h。在微电网中，因为有储能设备存在，可再生能源的输出可能受到限制。

不受限制的可再生能源：带有受限制可再生能源（如 30kW）的 MCP 和不受

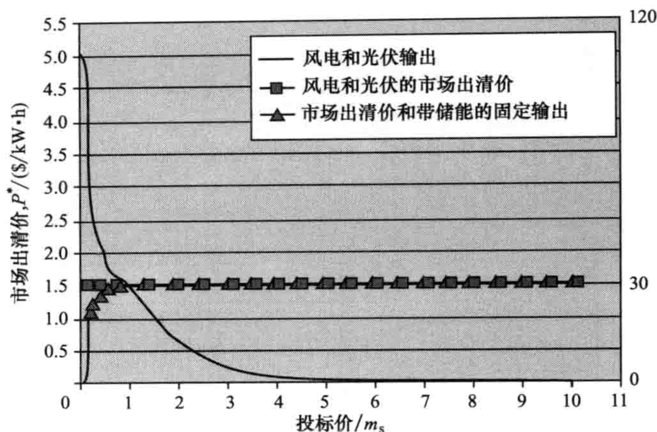


图 F-4 需求固定时 MCP 与投标价、发电量与投标价的曲线

限制的可再生能源在 $m_s = 1.0$ 时的 MCP 是一样的。市场出清价格的最大和最小值可以通过对式（F-4）关于 m_s 求偏微分，然后令其等于零解出。表 F-3 给出了 m_s 在从 0 到 10 变化时以下两种情况的支付金额和发电量：

情况 1：在可再生能源的发电容量固定为 30kW，且当 $m_s < 1$ 时，MCP = $ 1.5/kW · h；

情况 2：当 m_s 取值为 1 ~ 10 时，MCP 可以通过可再生能源和投标者 1、2、3 的输出来计算，之后用式（F-10）来进行调整。

表 F-3 投标者的支付金额和输出

发电机	输出/kW($m_s < 1$)	情况 1 的支付金额	输出/kW($1 < m_s < 10$)	情况 2 的支付金额
投标者 1	14	21	14	33.6
投标者 2	12	18	12	28.8
投标者 3	24	36	24	57.6
可再生能源	30	45	30	72
合计	80	120	80	192

F.5.2 案例 2：有线性需求报价的线性供应竞价（即双边报价市场）

在此案例中有两种参与报价的用户，如图 F-5 所示。用户的报价数据见表F-4，也考虑了需求的线性报价数据。

表 F-4 线性报价数据

用户	m_{dj}($ /kW · h/kW)	p_0($ /kW · h/kW)
投标者 1	0.041	6.0
投标者 2	0.077	7.0

出清价格由需求和供应曲线的交点求出，为 $ 3.4/kW · h。单个用户相应的需求可从图 F-5 中得到。

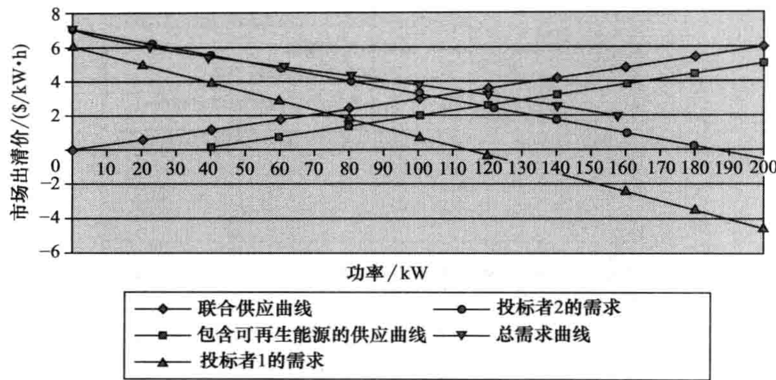


图 F-5 供应（联合）和需求（单个和联合）曲线

使用的数据：

报价者1的需求 = 64kW

报价者2的需求 = 46kW

总需求 = 110kW

发电供应者通过供应每一个报价者来满足这些需求，如：

投标者1（微燃机）发电量 = 33kW

投标者2（燃料电池）发电量 = 26kW

投标者3（柴油发电机）发电量 = 51kW

总发电量 = 110kW

如果可再生能源发电没有参与到竞标中来，那么其 30kW 的发电量将把市场出清价格降到 3 $/kW·h 并且用户的消费量会增加到：

报价者1需求量 = 72kW

报价者 2 需求量 = 52kW

总需求量 = 124kW

从图 F-5 可以看出：当可再生能源发电能供应 30kW 时，那么其他三个投标者将作如下变动：

投标者1（微燃机）发电量 = 23kW

投标者2（燃料电池）发电量 = 29kW

投标者3（柴油发电机）发电量 = 49kW

总发电量 = 101kW

从图 F-6 可以看出，当可再生能源发电的投标价低于 1.0 时，对受限制的 30kW 可再生能源发电容量对于市场出清价格是没有影响的。MCP 随着投标价的升高而上涨，但是分配给可再生能源的发电量将会减少。表 F-5 给出了不同 MCP 和相应输出下的支付金额。

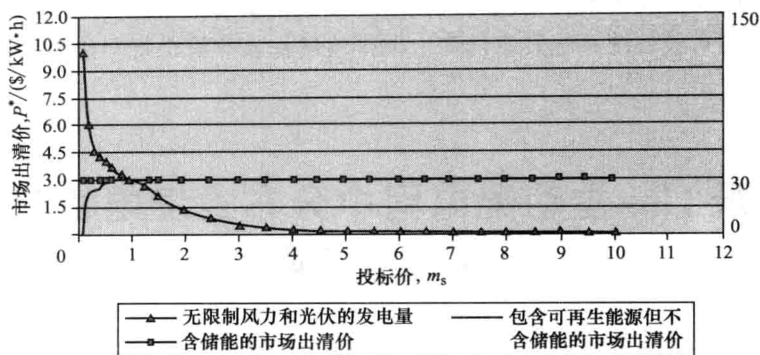


图 F-6 弹性需求时，MCP 和投标价的关系、发电量和投标价的关系

表 F-5 不同 MCP 下报价者支付的金额和输出

发电机	不含可再生能源		含可再生能源	
	发电容量/kW	支付金额(3.4 \$/kW·h)	发电容量/kW	支付金额(3 \$/kW·h)
供应方支付				
投标者 1	33	112.2	23	69
投标者 2	26	88.4	29	87
投标者 3	51	173.4	49	147
可再生能源	0	—	30	90
合计支付	110	374.0	131	393
需求方				
报价者 1	64	217.6	76	228
报价者 2	46	156.4	55	165
合计支付	110	374.0	131	293

F.6 对电力市场的影响

发电公司用竞价策略来使利润最大化，由此也显示出发挥市场支配力的各种潜在可能。市场支配力简单而言就是市场参与者根据自身需求来操控市场的能力。市场支配力存在的原因有输电拥堵、市场参与者和市场结构。

输电拥堵在输电系统中很常见。微电网系统可以缓解主电网输电拥堵，日前交易市场中对于电能生产的规划也可以缓解输电拥堵的问题。大型公司（即重要的市场参与者）可以轻易地操控能源价格，使其远远超过边际成本。微电网市场中的传统能源发电（微燃机、燃料电池）和可再生能源（RES）发电均参与其中。因为可再生能源发电的间歇性，市场结构和市场规则对于某些市场支配力的发挥也显得尤为重要，例如定价机制的制定——是统一定价还是根据标价支付。在微电网的市场中，市场波动的可能性几乎不存在。虽然要达到电力生产和电力需求的完全匹配几乎不可能，但是因为有储能系统就可以将这个差距缩小。碳排放无时无刻不

在警示我们应该把化石燃料型发电转变为非传统型发电。在这样的情况下，微电网系统的发电模式较传统系统具有优势。碳排放量税收政策也将间接鼓励微电网系统的发展。

附录G 主动配电网中分布式发电机孤岛运行的仿真研究

G.1 背景

由于日益增长的电力需求和对化石燃料发电厂造成环境污染的担忧，分布式发电概念在全世界范围内商业和技术领域的重要性都日益突显。分布式发电包括了小规模本地DG与主电网在配电网电压等级上的联网。DG由非传统的可再生能源如太阳能光伏、风力涡轮机、燃料电池、小型/微型水力、潮汐和波浪发电机和微燃机组成。这些技术因为能源效率高（微燃机或者基于燃料电池的热电联产系统）、环境影响小（光伏、风能、水电等）及其适用于作为不间断电源为电能质量（PQ）敏感型负荷供电等优点而受到青睐。电力市场改革和电子/通信技术上的进展使得通过先进的监控和数据采集（SCADA）提高了广泛分布的DG可控性。目前，已经对互联的DG作为联网和独立模式下的微电网运行开展了研究。

调查显示，尽管DG的渗透日益增长，但就其对现有电网带来的各种技术上的影响而言，电力工程师、网络运营商、管理者和其他利益相关者对于是否将DG加入到现有的系统内和将其作为电力孤岛独立运行仍然犹豫不决。电力孤岛运行就是DG独立运行为自身以及配电网的负荷供电。在此运行模式下，DG在配电网母线上为配电网负荷供电并维持该母线频率和电压的完全可控。

研究表明，DG的高渗透率（20%以上）以及DG的位置和大小对于运行、控制、保护和现有电网的可靠性都有相当大的影响。在允许市场参与和DG作为电力孤岛运行之前，这些问题都必须进行仔细评估和解决。这对于最大限度利用DG的发电潜力，提高电能质量（PQ）和可靠性，提供辅助服务如有功备用、负荷跟踪、临界负荷、无功备用和恢复而言都是必需的。

受DG渗透严重影响的领域是配电网系统的保护配合。传统的过电流保护是为具有单向故障电流的辐射型配电网设计的。然而，将DG连接到配电网后使单纯的辐射网络转变为有多重电源的复杂网络，这将故障电流的流动从单向变为双向。DG的稳态和动态特性也进一步影响到输电系统的运行。连接DG后给现有的电网保护带来各种影响：①馈线或保护设备的误跳闸；②保护盲区；③DG的连接和断

开情况下故障水平的变化；④计划外孤岛；⑤防止自动重合闸；⑥非同期重合闸；⑦由于 DG 仍然与电网母线连接而对操作人员造成的危险。

现行技术标准如 G83/1、G59/1、IEEE1547 和 CEI11-20 规定，如果在母线和 DG 连接处的断路器（CB）跳闸时，DG 应该从中压和低压配电网自动切离，这被称之为反孤岛特性，市面上 DG 的逆变器必须强制拥有。由于 DG 不受主电网直接控制，按照主电网运行的要求使用反孤岛效应保护是有理由的。反孤岛效应系统主要用于确保主电网侧人员的安全以及防止任何非同期的重合闸。经过大量研究，正在对各种低成本且高效的数字孤岛保护方案进行开发、测试和验证。

然而，随着更大范围的 DG 渗透，在与主电网解列（Loss of Grid，LOG）的情况下，DG 的自动切离大大降低了 DG 的预期效益。它还会导致电网故障中 DG 不必要的功率损失，同时也增加了保护系统的复杂性。目前，在系统发生干扰时保持 DG 连接的理念以及 DG 孤岛保护问题在全球研究人员中被广泛讨论。多个技术研究清楚地表明，为了支持 DG 孤岛运行，需要重新审视电力安全、质量和连续性条例（Electricity Safety，Quality and Continuity Regulations，ESQCR）的某些部分。为了以更好的方式发展 DG，未来很可能对 G59/1 和 G75，连同工程技术报告（ETR 113/1）进行改版升级，以适应更多的 DG 独立运行模式。目前正在开发新的电网规范以确保输电网络发生重大故障期间及之后电网的稳定性，这将给整个电网的稳定性和恢复能力带来好处。显然 ESQCR 对频率和电压偏离的限制过于严格而无法进行孤岛的无缝切换，应该开发多概率的方法（More Probabilistic Approach），类似于 EN50160 所使用的，来适应这样的事件，虽然无须使用相同的限制。

附录 G 给出了主动配电网络中对 DG 孤岛运行的仿真研究。它验证了 DG 孤岛运行的技术可行性，并以此来发挥其在提供辅助服务以及提高能源供应的整体质量和可靠性方面的优势。联网的 DG 运行在 P-Q 模式。在 P-Q 模式下，母线电压和频率由主电网单独控制，DG 提供固定的有功功率（P）和无功功率（Q）。从电网切离后，DG 就转换成 V-f（电压-频率）模式，作为具有母线电压和频率完全可控权的独立孤岛运行。使用适合的控制器分别对 DG 母线上的电压和频率进行独立控制。在此研究中，独立和并网的 28.1MV·A、11kV 燃气轮机（GT）用作 DG 的模型。仿真结果通过 DIgSILENT 软件对有意和无意的 LOG 状态下多个案例分析进行了验证。可以看出，联网的 DG 能很好地分担系统的有功和无功需求，因此使得系统的电压和频率在容许的带宽内更快速地恢复。然而，下一步的工作主要是研究带有不同种类 DG 和存储设备的混合电力孤岛的运行，以及调查孤岛 DG 需要与主电网再同步时应该选择的经济方案。

G.2 系统配置

三个系统的系统配置在下文中述及。

系统 1 如图 G-1 所示，该 DG 系统由一台 28.1MV · A、11kV 燃气轮机（GT）通过 33/11kV 变压器连接到 11kV 电网组成。

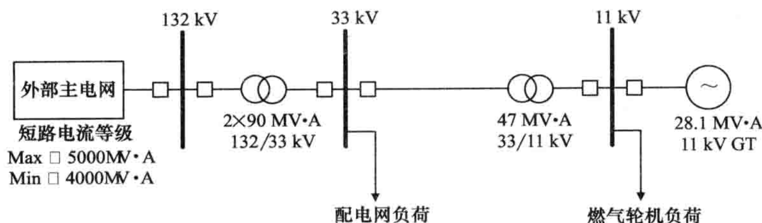


图 G-1　系统 1

系统 2 如图 G-2 所示，该 DG 系统由分别通过 33/11kV 变压器连接到 11kV 电

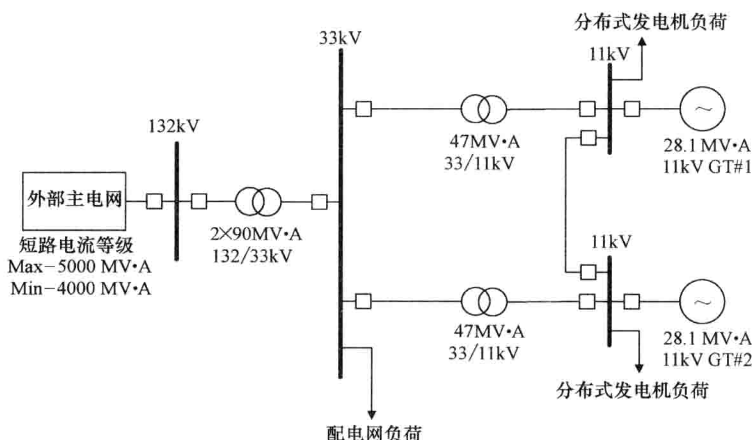


图 G-2　系统 2

网上的 2 台 28.1MV · A、11kV 的 GT（GT#1 和 GT#2）组成，GT#1 和 GT#2 通过 11kV 联络线再次互联。

系统 3 如图 G-3 所示，有三个 DG 系统，GT#1、GT#2 和 GT#3 分别作为一个系统。每一个 DG 都像系统 1 一样，由一台 28.1MV · A、11kV 的 GT 组成。所有 GT 都分别通过 33/11kV 变压器连接到 11kV 的电网。GT#1、GT#2 和 GT#3 通过电力联络线连接成一个三角形。

对所有的系统来说，通过 11kV 母线联网时 DG 都运行在 *P*-*Q* 模式，11kV 母线的电压和频率由电网调节。在孤岛运行时，DG 从 *P*-*Q* 模式切换到 *V*-*f* 模式，11kV 母线的电压和频率就由 DG 来调节，132kV 电网可以被看做相对于 DG 非常大的电力库。在此研究中，电网最大和最小短路容量分别被认为是 5000MV · A 和 4000MV · A，研究中使用最大容量。33kV 母线上的电网负荷被看做 100kW，而每个 GT 在孤岛运行时最大允许负荷为 23MW。DG 的 *V*-*f* 控制器是根据 IEEE 励磁控制器和频率控制器模型来进行建模的。

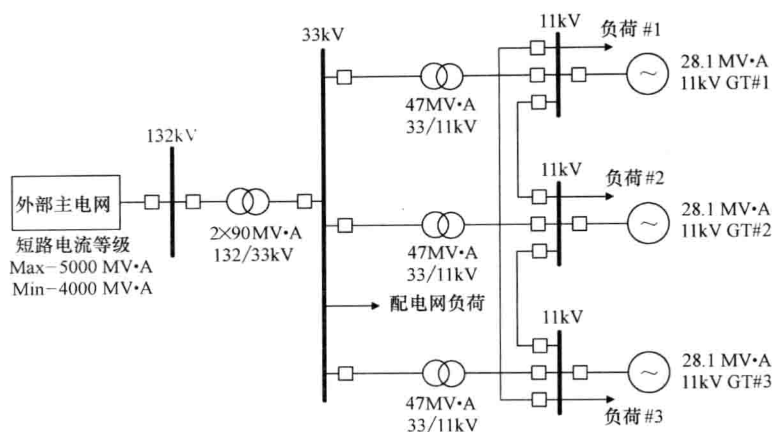


图 G-3　系统 3

G.3　案例研究

通过 G.2 节中描述的三个系统配置的多个案例研究，示出了 DG 成功的孤岛运行。对于所有研究而言，描绘的都是与 DG 相连的 11kV 母线上的电压和频率曲线。

G.3.1　案例研究 1

此研究在系统 1 上完成。孤岛化发生在 $t=25s$ 时，之后打开控制器。如图 G-4 的电压和频率曲线所示，在孤岛形成以后母线电压用了 7s、系统频率用了 6s 达到稳定。控制器能够将电压和频率的偏移控制在容许的极限范围以内。

G.3.2　案例研究 2

G.3.2.1　案例 2（a）

本研究在系统 2 上完成，简单的孤岛效应于 $t=25s$ 时在 GT#1 和 GT#2 上同时发生，GT#1 和 GT#2 之间的联络线在孤岛发生时连通。在本案例中，两个互连的 DGs 在孤岛化以后都不允许从 *P-Q* 模式切换到 *V-f* 模式，以避免孤岛后的控制冲突。控制策略是选取一个 DG 作为主控制器，另一个作为从控制器。主控制器 DG 在孤岛化以后开启 *V-f* 模式，来控制整个孤岛的电压和频率，而从控制器维持固定的发电。孤岛运行时任何额外的负荷都由主 DG 来承担。在本案例中孤岛化后 GT#1 成为主 DG，而 GT#2 则为从 DG。孤岛化发生之后母线电压用了 11s，系统频率用了 10s 达到稳定。从图 G-5 所示的母线电压和频率曲线可以看出，从 DG 的母线电压比主 DG 的母线电压稍低，这是由于互连线路上的压降所致。主控制器有足够的能力将电压和频率的偏移控制在容许的极限之内。两个 DG 都能够作为主控制器，

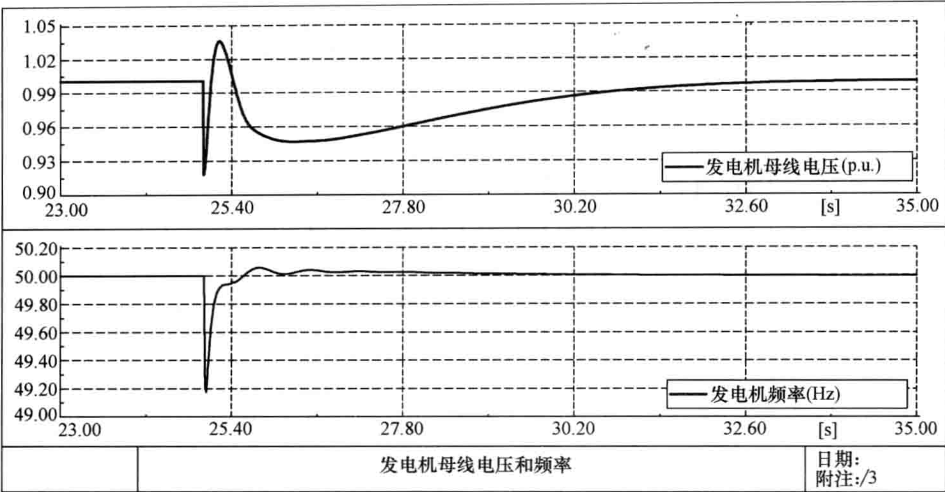


图 G-4 案例 1 在 11kV DG 母线下的电压和频率

另一个作为从控制器。将 GT#2 作为主控制器 GT#1 作为从控制器得到的响应是同样的。

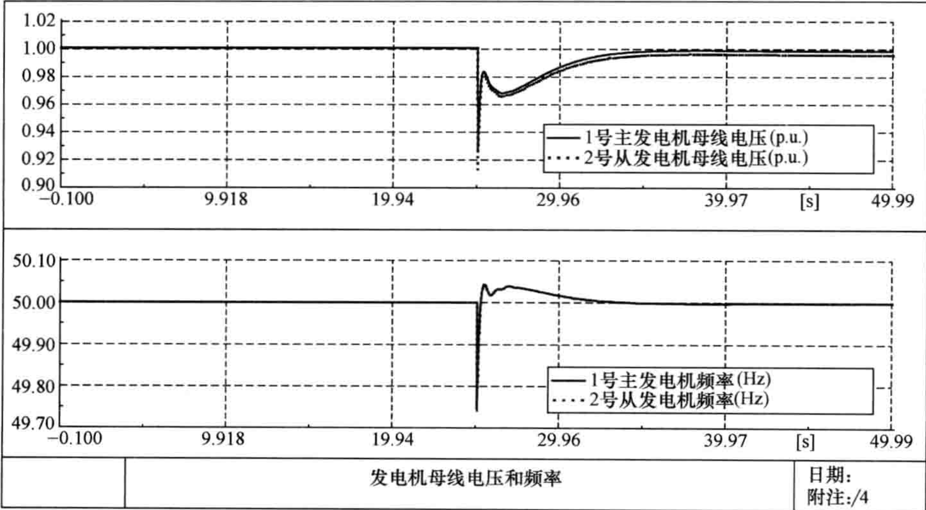


图 G-5 案例 2（a）在 11kV DG 母线下的电压和频率

G.3.2.2 案例 2（b）

本研究和案例 2（a）类似。这里，GT#1 在孤岛化发生时被用作主 DG，GT#2 作为从 DG。孤岛效应在 $t=25\text{s}$ 时发生且联络线闭合，GT#1 从 PQ 模式切换到 $V\text{-}f$ 模式以控制孤岛的电压和频率。当 GT#1 在 $t=50\text{s}$ 停运时，GT#2 成为孤岛中唯一的 DG，承担起全部控制和供应负荷的任务。然而当总负荷超过了其额定容量时，

多余的负荷就会被切掉。除了临时频率深度比案例 2（a）稍高外，图 G-6 所示的母线电压和频率的稳定时间和案例 2（a）中大致相同。电压和频率偏移都在容许的极限范围之内。

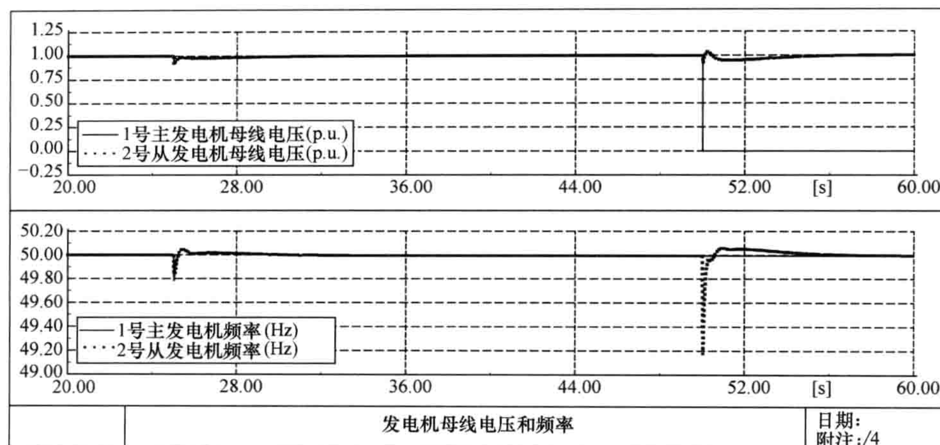


图 G-6 案例 2（b）在 11kV 的 DG 母线下的电压和频率

G.3.3 案例研究 3

G.3.3.1 案例 3（a）

在本案例中，全部三台 GT 都在 $t=25$s 时发生孤岛效应。GT#1 被指定为主控制器，GT#2 作为从控制器固定在 20MW 下发电，GT#3 则自治控制。在孤岛化时 GT#1 和 GT#2 之间的联络线是联通的而其他的联络线是断开的。在孤岛化时，将 GT#1 从 *P-Q* 模式切换到 *V-f* 模式来维持 GT#1 和 GT#2 的 11kV 母线的电压和频率，GT#3 也从 *P-Q* 模式切换到 *V-f* 模式来调节自身 11kV 母线的电压和频率。这样，两个独立的电力岛就形成了——一个由 GT#1 和 GT#2 组成，另一个由 GT#3 单独构成。仿真结果如图 G-7 所示。可以看出，当 DG 互联时其电压和频率下降的暂态响应比没有互联的 DG 要好，但是单个的 DG 比互联的 DG 所用的时间要少。尽管如此，两个电力孤岛的电压和频率偏移都在容许的极限范围之内。

G.3.3.2 案例 3（b）

此案例和案例 3（a）类似。然而在这里，GT#1 作为主控制器，GT#2 和 GT#3 均作为维持固定发电出力的从控制器。三台 GT 都在 $t=20$s 时发生孤岛效应。发生时所有的联络线都是闭合的，仅仅将 GT#1 从 PQ 模式切换到 *V-f* 模式。11kV GT 母线上电压和频率的响应如图 G-8 所示。由于联络线上的压降，DG 从控制器（GT#2 和 GT#3）母线上的电压比主控制器（GT#1）母线上的电压稍低一些。如图 G-8 所

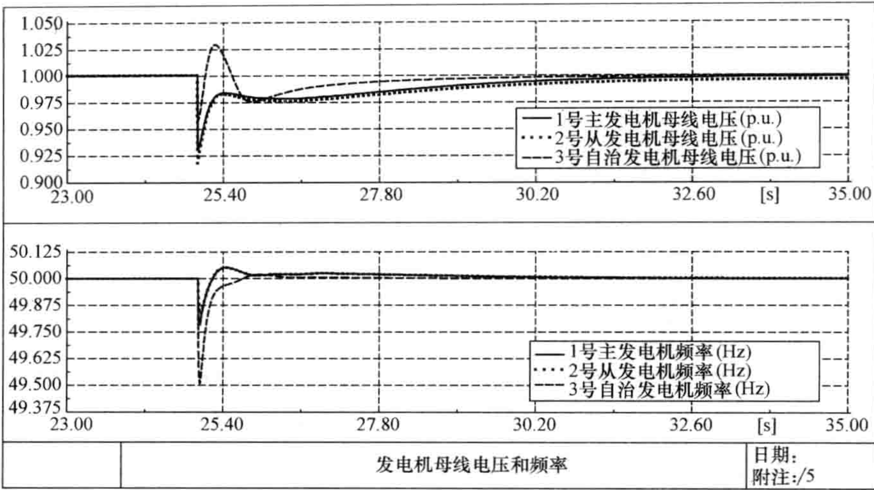


图 G-7 案例 3（a）的母线电压和频率

示，电压和频率偏移都在容许的极限范围之内。从此案例可以看出，任意一台 GT 都可以当做主控制器，其余的 GT 当做从控制器。

G.3.3.3 案例 3（c）

所有 DG 都在 $t=20\text{s}$ 时发生简单的孤岛效应。在发生孤岛效应时，所有 DG，GT#1、GT#2 和 GT#3 之间的联络线将它们互联形成了一个三角形连接的孤岛。发生孤岛效应时，GT#1 用作主控制器并切换到 V-f 模式。在 $t=40\text{s}$ 时，GT#2 切换为主控制器而 GT#1 变为从控制器。GT#3 则一直作为从控制器保持固定发电输出。图 G-9 表明，由于联络线上的线路压降，DG 从控制器上的母线电压比 DG 主控制器上的母线电压稍低一些。孤岛模式下的电压和频率偏移都在容许的极限范围之内。所有的 DG 都能作为主控制器。经过测试发现，任意一个 DG 作为主控制器得到的响应都是相同的。

G.3.3.4 案例 3（d）

本案例和案例 3（c）相似，在 $t=20\text{s}$ 时发生孤岛效应，形成了一个三角形连接的孤岛，GT#1 用作主控制器，其余 GT 作为从控制器。在 $t=40\text{s}$ 时，GT#2 成为主控制器，其余 GT 作为从控制器。在 $t=60\text{s}$ 时，GT#3 成为主控制器，其余作为从控制器。孤岛模式下的电压和频率偏移都在容许的极限范围之内，如图 G-10 所示。

此案例说明，如果单个的 DG 被允许作为电力孤岛运行又或者互联的 DG 能作为微电网运行，那么系统整体的供电质量和可靠性就会显著提高。因此，现在正是修改现行标准以适应 DG 运行和通过电力市场改革以鼓励 DG 及微电网参与市场的时机。

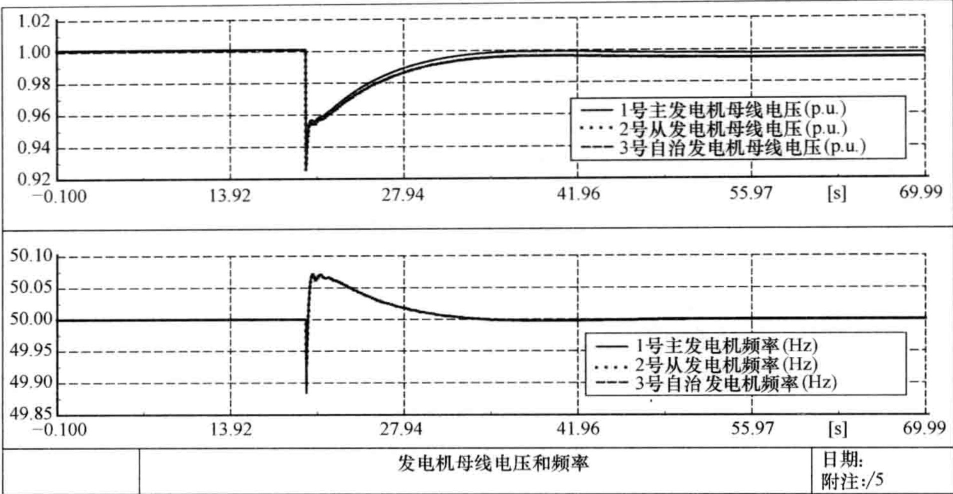


图 G-8 案例 3（b）的母线电压和频率

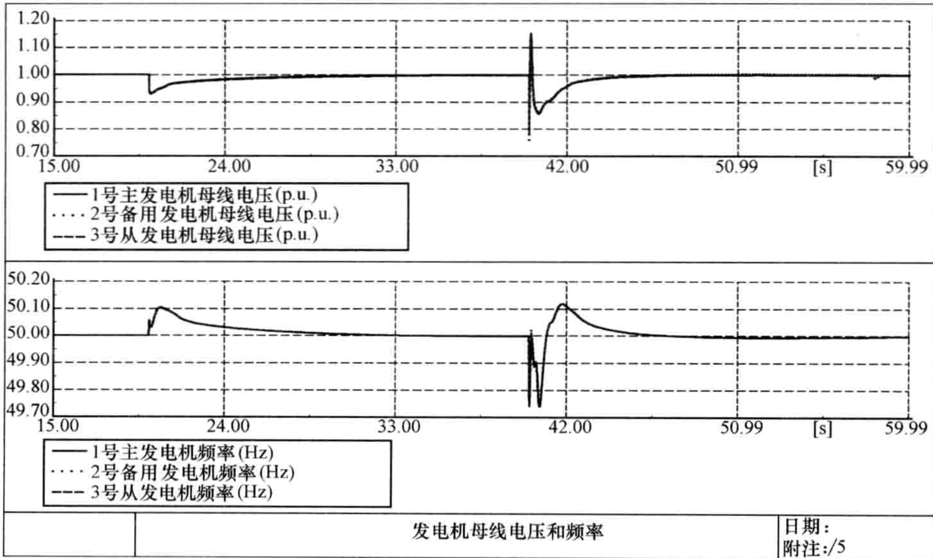


图 G-9 案例 3（c）的母线电压和频率

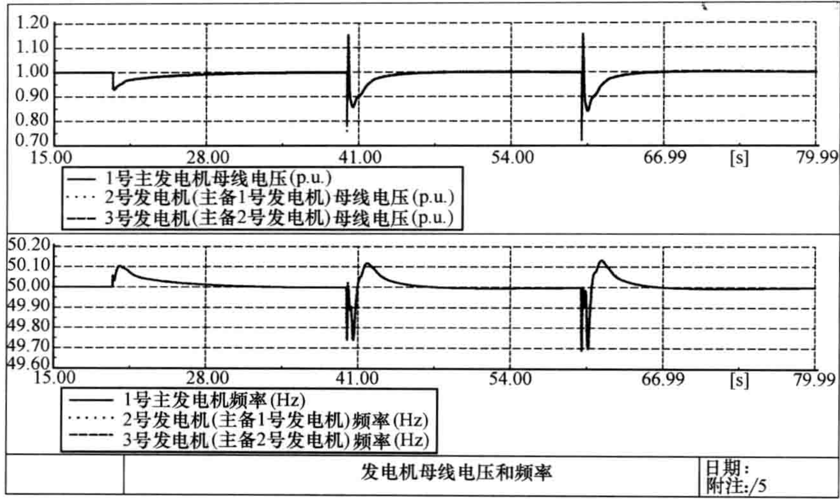


图 G-10 案例 3（d）的母线电压和频率

后　记

2013年春，致力于智能电网应用研究的云南电网公司电力研究院技术人员在网上查阅到《Microgrids and Active Distribution Networks》一书的原稿。初步浏览后感觉内容甚佳，经内部研究，准备将其作为学习主动配电网和微电网技术的重要教材和对实际工作的指导书。为使该书发挥最大效益，云南电网公司继刚刚完成美国麻省理工学院最新研究报告《电网的未来》一书翻译后，又决定组织对本书进行翻译。

为做好本书的翻译工作，云南电网公司专门成立翻译工作组，认真组织系统内的专业技术骨干和翻译人才队伍，共同承担起此项重任。本书的主要翻译任务由从事智能电网研发的一线科技人员承担，校对和审稿由云南电网公司和云南省翻译协会电力分会的资深翻译专家承担和参与。在总结《电网的未来》一书翻译工作经验的基础上，本书的整个翻译工作有较大改进和提高。参与翻译和校对审稿的人员交叉校阅，并多次召开小型讨论会，充分发挥集体的智慧。翻译工作自2013年8月正式启动，10月全面展开，2014年1月中旬完成初稿。随后，我们在征求云南电网公司相关专业部门和单位对本书译稿中的专业技术内容提出修改完善意见的基础上，采用集体讨论的方式对本书译稿逐段逐句进行修改，经数次反复推敲，最终于2014年4月底正式定稿。

本书是云南电网公司于2012~2013年完成《电网的未来》翻译出版之后开展的又一重大翻译任务。本书的内容和《电网的未来》同样新颖、前沿和领先，且在技术方面更加专业和深入，这无疑对我们的翻译人员是一次巨大的挑战，也是一次新的学习和锻炼。参与本次翻译工作的同志均感到受益匪浅，收获颇丰。对于如此专业的技术专著，我们翻译工作组成员对一些较为专业的术语仍有一些斟酌、思考和疑虑，我们尽可能准确达意，又要尽力兼顾专业人员和非专业人员都能充分理解译文。为此，我们针对整个翻译过程中的有关问题进行一些说明和解释，愿与读者进行探讨和交流。

1. 在本书中“microgrid”和“microsource”是两个举足轻重的关键性词汇，出现频次较高，工作组内一直存在争议。由于“微网”一词已不

时见诸于业内的文献中，且很多专业人员也接受了“微网”的说法，因此一开始“microgrid”被译为“微网”。然而有翻译人员认为此翻译违背科技术语定名与协调统一原则中的“单一性”原则，即科技术语是单一、专用的，从理论上讲，一个术语应只对应一个概念，即一词一义，故本书中的“microgird”译为“微电网”应更准确。对此，工作组成员反复争论，最后，在认真推敲本书第一章中作者对“microgrid”概念的阐述后，工作组同意将其译为“微电网”。“microsource”一词也存在类似的问题，其指的是小型的热电联产、风能转换系统、太阳能光伏发电、水力发电及其他可再生能源等分布式能源，有人建议译为“微能源”，但基于尊重原文的原则，最后确定译为“微源”。尽管如此，分歧意见依然存在。

关于上述这两个词的翻译，给我们提出了一个问题：科技术语定名与协调统一的原则是否要坚持？如果答案是肯定的，那么在一些术语翻译已为大众接受的情况下又如何坚持这个原则？这兴许只有待国家标准委员会等更高权威机构对这类术语进行最终翻译的明确。

2. 本书翻译的最大难度主要在专业技术术语的把握上。一方面，本书中出现诸多新技术、新概念和新的专业内容；另一方面，一些常规词也被赋予了新的含义。

1）“brick”一词，在第6章“电力电子接口”中多次出现，中国计算机学会编撰的《英汉计算机词汇》给出的释义为“砖，程序块”，我们开始选用了“程序块”。后在集体讨论中发现，其实际含义是一个硬件的概念，此翻译显然不妥。后改为“模块”，但这种译法也未必最佳且存在不同意见，值得读者斟酌。

2）在第2章出现的“cross-flow impulse turbine”一词，翻译人员最初译为“错流式冲击水轮机”，后在集体讨论时，经与水轮机专业人员交换意见，认为“cross-flow”在小型水轮机中应该是指“混流”的概念，因此，译为“混流式冲击水轮机”更切合实际。

3）“blind of protection”其原意是指继电保护出现了盲区、盲障，即检测不到故障。但专业人员一般不这样说，故我们遵循专业习惯将原来直译的“保护盲障”改为国内行业常用的说法“保护死区”。

4）“protection coordination”中，“coordination”的基本释义为协调、协作，译为“保护协调”没有错误，但国内的继电保护专业说法是“保护配合”，所以我们采用专业上已经接受的说法进行翻译。

这些例子反映出中外双方对同样的事物或现象在认知和描述上存在差异，我们在翻译时应尽可能地使之符合或贴近我国行业内的习惯用

法，这也对科技翻译提出了更高的要求。为达到翻译界历来推崇的“信、达、雅”的标准，从事科技翻译的人除了要提高外语水平和中文水平外，还要努力拓宽自己的专业知识面，熟悉专业和行业内的一些术语和惯用表达或描述。

3. 在本书翻译和校对过程中，部分翻译人员基本使用网络词典查询，而有的翻译人员则主要是依赖于传统的词典等工具书。前者翻译时对一些词语的翻译和选取持较灵活、开放的态度，而后者则显得更为严格和谨慎，有时似乎让人觉得古板甚至保守。对于同一个专业术语的翻译，在网络查词和词典查词显示出多个可选择的翻译表达时，还应依据原文中的上下文内容来确定选择最合适的翻译。例如，“power converter”一词主要出现在第6章“电力电子接口”中，中国水利水电出版社出版的《英汉电技术词汇》中给出的释义为：电力变换机，电力变换器，整流器。有翻译人员认为该词在这一章节中主要指变流装置中的逆变器，译为“逆变器”较为适宜。但另有同志认为，虽然此意见有道理，但若全都这样处理似乎又失之偏颇，建议还是译为“电力变换器”，一是因为“逆变器”或“整流器”另有对应的英文词，二是“电力变换器”一词还有更多内涵，其不光是指变流装置，还可以指频率变换装置、相位变换装置及功率变换装置等，当然最佳的处理还是具体情况具体分析。

通过本书的翻译，我们深切感受到在当今科技信息飞速发展的时代，新概念、新词语以及新的表达和描述大量、快速地涌现、传播和使用，这是社会发展和科技进步的结果，也是互联网时代的产物。这无疑会给我们带来一些困扰，对此，我们应持开放、宽容的态度，无须苛求。科技术语的定名需要一个过程，新词语、新术语会在实践的检验中发展、变化，优胜劣汰。通过对技术专著的翻译，能对翻译理论和实践的思考有所提升，确实是全体翻译工作组成员的最大收获。

本书在翻译过程中得到了南方电网公司和云南电网公司领导的关心和指导，以及云南电网公司相关部门、云南电力研究院和云南省翻译协会的支持和帮助，在此深表谢意。

本书翻译历时半年多，受翻译和校译人员水平以及工作时间所限，错漏之处在所难免，欢迎读者批评指正，并对我们的中文译稿提出宝贵的意见和建议。

《微电网和主动配电网》翻译工作组

2014年7月31日

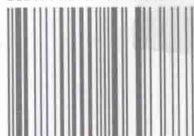
国际视野　科技前沿

国际电气工程先进技术译丛

传播国际最新技术成果　搭建电气工程技术平台

《微电网和主动配电网》
《双馈感应电机在风力发电中的建模与控制》
《电池系统工程》
《高性能交流传动系统 —— 模型分析与控制》
《光伏发电系统的优化 —— 建模、仿真和控制》
《自主移动机器人行为建模与控制》
《覆冰与污秽绝缘子》
《高压直流输电——功率变换在电力系统中的应用》
《MATLAB数值分析方法在电气工程中的应用》
《太阳能利用技术及工程应用》
《超级电容器的应用》
《小型风力机：分析、设计与应用》
《太阳电池、LED和二极管的原理：PN结的作用》
《风力发电系统 —— 技术与趋势》
《可持续电力系统的建模与控制：面向更为智能和绿色的电网》
《电力系统高级预测技术和发电优化调度》
《大规模储能技术》
《风电系统电能质量和稳定性对策》
《环境能源发电：太阳能、风能和海洋能》
《传热学：电力电子器件热管理》
《现代电力电子学与交流传动》
《功率半导体器件：原理、特性和可靠性》
《风能系统——实现安全可靠运行的优化设计与建设》
《储能技术》
《光伏系统工程》（原书第3版）
《光伏与风力发电系统并网变换器》
《车辆能量管理：建模、控制与优化》
《纯电动及混合动力汽车设计基础》（原书第2版）
《电动汽车技术、政策与市场》
《永磁无刷电机及其驱动技术》
《先进电气驱动的分析、建模与控制》
《智能电网可再生能源系统设计》
《风力发电工程指南》
《用于制造固体氧化物燃料电池的钙钛矿型氧化物》
《太阳能物理》
《柔性交流输电系统在电网中的建模与仿真》
《风电并网：联网与系统运行》
《可再生能源的转换、传输和储存》
《海底电力电缆——设计、安装、修复和环境影响》
《光伏技术与工程手册》
《风力发电的模拟与控制》
《风电场并网稳定性技术》
《智能电网中的电力电子技术》
《电磁屏蔽原理与应用》
《高效可再生分布式发电系统》
《电网保护》
《分布式发电——感应和永磁发电机》
《电力系统谐波》
《风能与太阳能发电系统——设计、分析与运行》（原书第2版）
《瞬时功率理论及其在电力调节中的应用》
《风力机控制系统原理、建模及增益调度设计》
《高压输配电设备实用手册》
《电力变流器电路》
《电力系统中的电磁兼容》
《超高压交流输电工程》（原书第3版）
《高压直流输电与柔性交流输电控制装置——静止换流器在电力系统中的应用》
《配电可靠性与电能质量》

ISBN 978-7-111-46937-7



上架指导　工业技术／电气工程

ISBN 978-7-111-46937-7

定价：59.00元

[General Information]
书名=微电网和主动配电网
SS号=13606536